

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

今村年成¹・室野剛隆²・畠中仁³・棚村史朗³・室谷耕輔¹

¹正会員 工修 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原 1-8-29)

²正会員 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 工修 財団法人 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

基盤面が大きく変化しているような地盤（以下“不整形地盤”という）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場合には、この影響を適切に評価することが重要である。本報告では、このような地震動の増幅特性を定量的に把握するために、片側不整形地盤（表層厚 20m、基盤の傾斜角 1:5）をモデル化し、2次元地震応答解析を行った。基本的な波動伝播特性を調べるために、表層地盤は線形材料と非線形材料（土の応力ひずみ関係は RO モデル）の2種類で評価した。不整形地盤では基盤傾斜部から水平成分と鉛直成分を持つ2次的な表面波が発生すること、地震動が局所的に増幅すること、地盤の非線形化が進んだ状態では応答加速度が2倍程度まで増幅する可能性があることを確認した。

Key Words : Geological Irregularity, non-linearity of soil, 2D-FEM, L2-earthquake

1. はじめに

基盤面が大きく変化している地盤（以下“不整形地盤”という）では、地震動が局所的に増幅することが知られている。これまで、多くの数値解析が行われており、基盤傾斜部で2次的な波動が生成され水平方向に伝播し、鉛直下方から伝播してきた重複反射と局所的に増幅的干渉をすることにより、地震動が大きくなることや、2次的な生成波により継続時間が長くなることが解明されてきた¹⁾²⁾。ただし、その多くは数 km オーダーの不整形地盤を対象としたものである。特に、兵庫県南部地震では、深層地盤の不整形性により震災の帯が形成され、注目を集めた。

一方、構造物の耐震設計では、設計地震動を工学的基盤 ($V_s=400\text{m/s}$ 相当) で規定していることから、浅層の不整形性が重要となる。浅層地盤の不整形性を扱った研究³⁾⁴⁾も行われており、その簡易な評価方法も提案されている⁵⁾⁶⁾。さて、浅層地盤でもう一つ地震工学的に重要なのは土の非線形化である。レベル2地震を考えた場合、土には数%のひずみが発生し、土の非線形化により地震動は大きく変化する。しかし、浅層不整形性を扱った多くの研究は、ほとんどが線形解析または等価線形解析によるものであり、非線形性を扱った研究⁷⁾⁸⁾は少ない。

そこで、本研究では、L2地震動のような大地震動に対して構造物の耐震設計を行うことを念頭に置き、地盤の非線形性を考慮した2次元地震応答解析を行い、浅層地盤の不整形性が地震応答に及ぼす影響を調べた。また、比較のために、非線形解析で得られた最大せん断ひずみから、等価線形的にせん断剛性と減衰定数を低減させて地盤定数を与えた線形解析も実施した。

その結果、既往の線形解析を基本とした研究と同様に、1)不整形地盤では基盤傾斜部から水平成分と鉛直成分を持つ2次的な表面波が発生すること、2)地震動が基盤傾斜部から平坦部へ移る辺りで局所的に増幅すること、3)非線形解析では線形解析よりも不整形性の影響が顕著に生じることを確認した。

2. 解析手法と非線形モデル

本研究では、2次元 FEM モデルを用いた逐次非線形解析を行った。地盤の非線形モデルには様々な方法が提案されているが、ここでは Ramberg-Osgood モデル（以下、RO モデル）を用いた。骨格曲線を式(1)で与え、履歴法則に Masing 則を用いた。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left\{ 1 + \alpha \cdot \left(\tau / \tau_f \right)^{p-1} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $G_{\max}$ は初期せん断弾性係数、 τ_f は基準ひずみ γ_r を用いて、

$$\tau_f = G_{\max} \cdot \gamma_r$$

で算定される。 $\alpha = 2^{\beta-1}$ で、 β は、最大減衰定数 $h_{\max}$ を用いて

$$\beta = \frac{2 + \pi \cdot h_{\max}}{2 - \pi \cdot h_{\max}} \quad (2)$$

である。

面内運動における解析では、せん断応力以外に軸方向成分も同時に考慮されなければならない。平面ひずみ仮定下での応力～ひずみ関係を与える構成式は、

$$\{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \tau_{xy}\}^T = [D] \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \gamma_{xy}\}^T \quad (3)$$

であり、構成マトリクス $[D]$ は、

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu} & \frac{2G\nu}{1-2\nu} & 0 \\ \frac{2G\nu}{1-2\nu} & \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。ここに、 ν はポアソン比である。非線形解析の手法については、竹宮ら⁹⁾の手法に従い、次に示す最大せん断応力並びに最大せん断ひずみを応力～ひずみの不変量として、RO モデルに導入した。

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (5a)$$

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (5b)$$

ここに、 σ_1, σ_3 は主応力であり、

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (6)$$

3. 解析ケース

解析ケースの一覧を表-1 に示す。すべての解析ケースで用いた地盤モデルは同一で、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である。表層厚は20m、基盤の傾斜角は1:5とした。また、下層境界は粘性境界とし反射波を吸収している。側方境界はローラー境界としたが、反射波が解析結果に影響を与えないように十分に広く解析領域を設定した。表層地盤の応力ひずみ関係は、case1～3 ではRO モデルを、case4～6 では線形モデルを用いた。なお、線形モデルでは、case1～3 の解析で得られた最大せん断ひずみから、等価線形的に、せん断剛性と減衰定数を設定している。基盤は密度 $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$ 、せん断弾性波速度 $V_s = 400 \text{ m/sec}$ 、内部減衰定数 $h = 2\%$ とした。

なお、入力地震動は、地盤の卓越周期 ($T_g = 0.80 \text{ sec}$) を中心周期に持つ Ricker 波および、鉄道構造物の耐震設計で用いられるスペクトルII波 (基盤用)⁹⁾である。

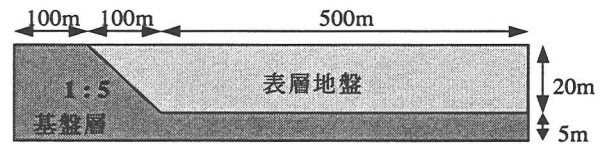


図-1 解析地盤モデル

4. 解析結果

(1) 基本特性

地盤の不整形性が地震動の増幅に対してどのような影響を与えるのかについて、Ricker 波での応答を元に基本的な検討をする。図-2 は、不整形地盤での地表面最大応答加速度と水平成層地盤でのそれを比較したもので、横

表-1 解析ケース一覧

		入力地震動 Ricker 波 (スペクトルII波)	Vs (m/sec)	密度 (t/m ³)	ポアソン比 ν	表層地盤 の構成則	RO モデル		線形
							基準ひずみ γ_r	最大減衰 定数 $h_{\max}$	減衰定数 h
case1	表層	100gal	100	1.6	0.49	RO	0.001	0.20	—
	基盤	(150gal)	400	2.0					
case2	表層	300gal	100	1.6	0.49	RO	0.001	0.20	—
	基盤	(300gal)	400	2.0					
case3	表層	500gal	100	1.6	0.49	RO	0.001	0.20	—
	基盤	(750gal)	400	2.0					
case4	表層	100gal	57	1.6	0.49	等価線形	—	—	0.135
	基盤	(150gal)	400	2.0					
case5	表層	300gal	48	1.6	0.49	等価線形	—	—	0.155
	基盤	(300gal)	400	2.0					
case6	表層	500gal	42	1.6	0.49	等価線形	—	—	0.164
	基盤	(750gal)	400	2.0					

軸に基盤傾斜部からの距離を、縦軸に表面応答加速度の最大値の比率（不整形地盤での最大応答加速度／水平成層地盤での最大応答加速度）をとっている。

地盤の不整形性の影響が現れ、成層地盤での応答に対し地震動が増幅しているのは、基盤傾斜部から 100m ぐらいの範囲までであり、それより離れたところでは、成層地盤での応答加速度と同じ値を示している。また、増幅度が最大になるのは、基盤傾斜部から平坦部に移る辺りである。これらの傾向は、既往の研究でも指摘されてきたが、非線形解析、線形解析の両方で共通に見られた。ただし、非線形解析では、最大応答加速度の倍率は地震レベルとともに大きくなっており、100gal の入力に対して 1.4 倍、300gal に対して 1.7 倍、500gal に対して 1.9 倍程度であるのに対し、線形解析では、地震レベルによる変動は小さく、1.2～1.3 倍程度であった。

次に、線形解析と非線形解析で増幅率が大きく異なる要因を調べるために、地表面応答加速度の時刻歴波形を描いてみた。地表面応答加速度の水平成分を図-3 に、鉛直成分を図-4 に示す。なお、図面上、鉛直成分の振幅は水平成分の 2 倍で表示している。

水平成分に着目し、線形解析と非線形解析を比較する。基盤傾斜部から十分に離れたところでは、両者の最大応答値は同レベルであり、ともに成層地盤と同じような応答を示している。一方、先に見た加速度倍率の大きな区間（基盤傾斜部から平坦部に移る地点から 100m ぐらいの範囲）では、線形解析での応答に比べ、非線形解析の応答がかなり大きくなっていることが分かる。

次に鉛直成分に着目する。基盤傾斜部で鉛直成分が生成され、それが減衰しながら水平方向へ伝播している様子が確認できる。鉛直成分の励起されている範囲は、図-2 に示した増幅率の大きな区間とほぼ一致しており、地表面応答加速度の増幅率が最も大きくなる基盤傾斜部から平坦部へ移る地点で、鉛直成分も最も大きくなっている。線形解析と非線形解析を比較すると、線形解析よりも非線形解析の方が、鉛直成分の励起している区間が広く、また最大値も大きくなっている。

表-2 に最大加速度の一覧を示す。表中の括弧内の数値は、100gal 入力に対する比率である。この結果から、せん断波（重複反射波）は地盤の非線形化により加速度の増幅が抑えられるが、不整形地盤では非線形化による影響度が小さくなっている。特に、鉛直成分にその傾向が顕著である。

これらより、既往の多くの研究で指摘されているように、不整形地盤では、基盤傾斜部で水平成分と鉛直成分を持つ表面波が生成され、それが水平方向に伝播することによって、地震動に大きな増幅が生じていることが分かる。しかも、興味深いのは、地盤の非線形化によりその不整形性による効果（成層地盤に対する増幅度）が大

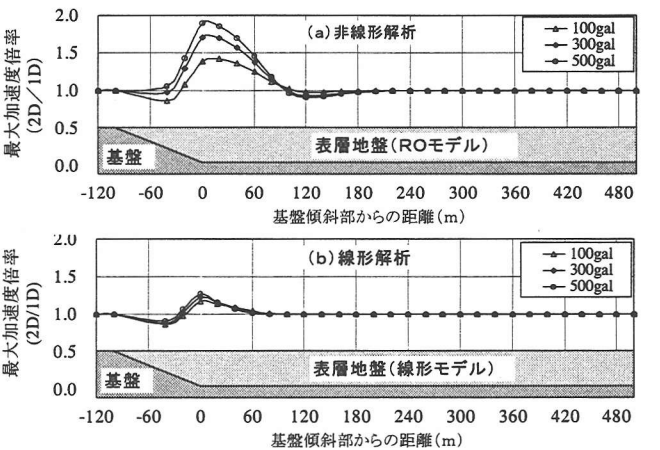


図-2 不整形地盤と水平成層地盤の最大応答加速度の比率

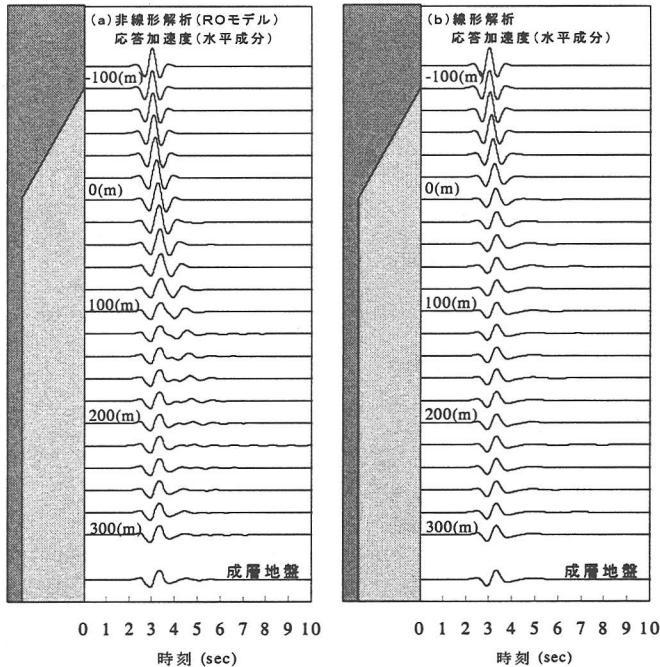


図-3 地表面応答加速度（水平成分）

表-2 最大応答値一覧表

入力 最大加速度	重複反射波 (gal)	2次元解析 (gal)	
		水平成分	鉛直成分
100gal (1.0)	109 (1.0)	152 (1.0)	48 (1.0)
300gal (3.0)	221 (2.0)	378 (2.5)	122 (2.5)
500gal (5.0)	304 (2.8)	579 (3.8)	188 (3.9)

きくなるという点である。

(2) 地震波に対する増幅率

入力地震動の周波数特性の違いにより、増幅率が異なる可能性がある。そこで、鉄道構造物の耐震設計で用いられる設計地震動（スペクトルⅡ基盤波）²⁾による地震応答を調べた。その結果を図-5 に示す。非線形解析では、最大加速度の比率（2D/1D）は、150gal の入力に対し 1.4 倍、300gal に対し 1.6 倍、750gal に対し 2.0 倍程度であり、

地震レベルとともに大きくなっている。一方、線形解析では、地震レベルによる変動は小さく、1.2~1.3 倍程度である。これより、実際の地震波のように、様々な周波数を含んだ地震動に対しても、同様の結果が得られることが確認できた。

(3) 初期せん断弾性波速度の影響

表層地盤の初期せん断剛性が不整形地盤での増幅率に与える影響を調べた。初期せん断弾性波速度 $V_s = 100\text{m/sec}$ の条件下で最も大きな増幅を示した Case6 と比較するために、入力地震動としてスペクトルⅡ基盤波 750gal、初期せん断弾性波速度 $V_s = 200\text{m/sec}$ として解析を行った。その結果を図-6 に示す。同図より、表層地盤の初期せん断弾性波速度が大きくなると、地盤の不整形性の影響は小さくなることが確認できる。これは、地盤の非線形化する度合いが $V_s = 100\text{m/sec}$ の場合よりも小さいためであると思われる。

5. 結論と今後の課題

不整形地盤での地震動の増幅特性を定量的に把握するために、片側不整形地盤（表層厚 20m、基盤の傾斜角 1 : 5）をモデル化し、2次元地震応答解析を行った。表層地盤は、線形材料と非線形材料の2種類で評価した。非線形解析では、土の応力ひずみ関係は、RO モデルを用いた。線形解析では、非線形解析で得られた最大せん断ひずみから、等価線形的に、せん断剛性と減衰定数を低減させて地盤定数を与えた。解析の結果、既往の研究で指摘されている特徴（①不整形地盤では基盤傾斜部から水平成分と鉛直成分をつ2次的な表面波が発生すること、②基盤傾斜部から平坦部へ移る辺りで、地震動の増幅が起ること）以外に、以下の特徴が確認された。

- 1) 非線形解析では、地震動が大きくなるに従い増幅率も大きくなるが、等価線形的にパラメータを決めた線形解析では、増幅率は地震レベルの影響をあまり受けない。
- 2) 地盤の不整形性が地震動の増幅に与える影響は、初期せん断剛性の大きな地盤ではあまり大きくならない。

今後は、線形解析と非線形解析での増幅率が異なる原因について、詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 川瀬博，松島信一：三次元盆地構造を考慮した 1995 年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション，建築学会構造系論文集，第 514 号，111-118，1998。

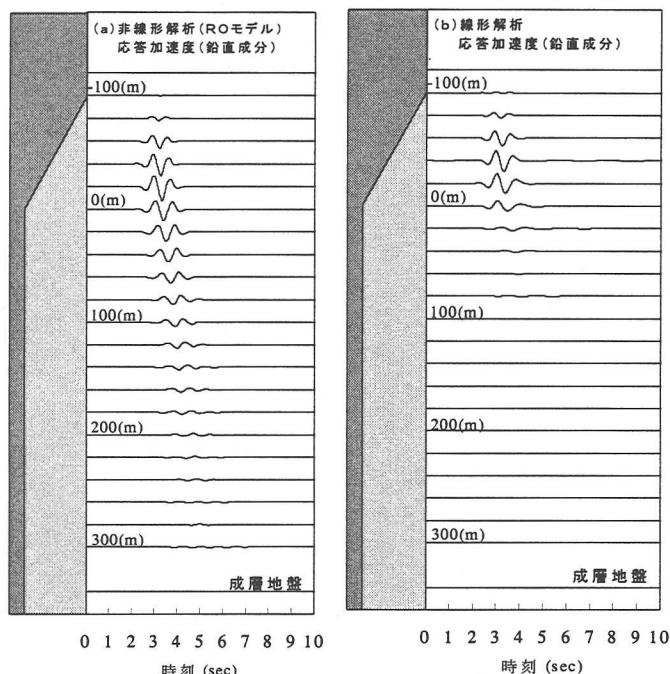


図4 地表面応答加速度（水平成分）

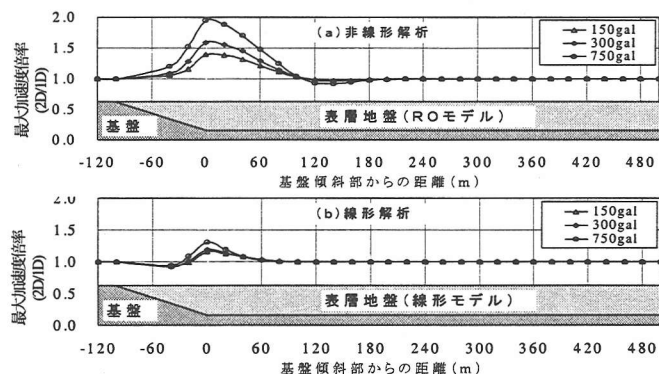


図5 最大加速度の比率（スペクトルⅡ波 750gal）

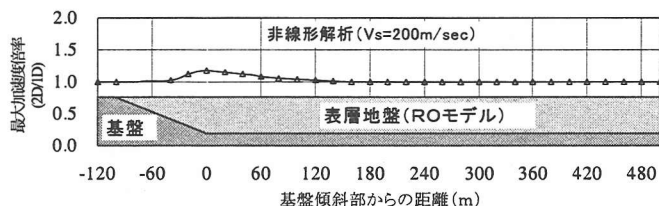


図6 最大加速度の比率 ($V_s=200\text{m/sec}$)

- 2) 大槻明，田蔵隆，清水勝美：傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ，土木学会論文集 第 350/I-2, 291-300, 1984。
- 3) 神山眞，松川忠司，吉田勝，佐藤勉：疑似スペクトル法による不整形地盤の地震応答解析とその評価，第 25 回地震工学研究発表会，137-140，1999。
- 4) 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変化の影響と耐震設計への適用に関する提案，ロカルト・エイト・シンポ 論文集，183-188，1998。
- 5) 竹宮宏和，石山基：不整形・非線形性を考慮した沖積地盤の地震応答性，土木学会論文集 No.477/I-25, 73-81，1993。
- 6) 鉄道総合技術研究所，鉄道構造物等設計標準・同解説，丸善出版，1999。