不整形地盤における非線形応答に対する1次元モデルの適用性の検討

1. 研究の背景と目的

首都直下型地震や南海トラフ地震の懸念が高まってい る中、予測地震動の中には告示スペクトルを超えている ものもある。大地震の場合、地表面における地震動は土 の非線形の影響を強く受ける可能性があるため、地盤の 地震応答解析においてこれを考慮することは地震動を精 度よく予測する上で必要なことであると考えられる。ま た、V字谷や埋没谷など、基盤の傾斜がみられるような 不整形な地盤における、大地震時の加速度応答やひずみ 応答は平行成層地盤とは異なる可能性が考えられる。そ こで、本検討では土の非線形性が強く表れるような大地 震時において、不整形を考慮した地盤に対する2次元有 限要素法による非線形解析を実施し、土の非線形性や地 盤の不整形性が地表面の応答性状にどのような影響を与 えるかを考察するとともに、設計で通常用いられる場合 が多い1次元モデルの適用性について検討を行う。

2. 解析概要

本検討では、不整形な地盤において、2次元有限要素 法を用いた非線形解析を行う。また、非線形が地表面の 応答性状に与える影響を考えるために線形解析も併せて 行う。

2.1 土の履歴モデル

本検討では土の履歴モデルに修正 Ramberg-Osgood モ デル(以下修正 R-O モデル)を用いる。

修正 R-O モデルはもともと金属材料の非線形解析の ために R-O モデルとして提案されたものであるが、龍 岡らの修正式¹⁾によって地盤の物理量との対応をとるこ とができた。履歴曲線には Masing 則を適用して求めら れる。修正 R-O モデルの式は以下のように表される。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{G}{1 + \alpha |\gamma G|^{\beta}}$$
(1)

$$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{0, 5}G_0}\right)^{p}$$
(2)

$$\beta = \frac{2\pi n_{\text{max}}}{2 - \pi h_{\text{max}}} \tag{3}$$

ここでG:せん断弾性係数、 G_0 :初期せん断弾性係数、 γ : せん断ひずみ、 $\gamma_{0.s}$: G/G_0 が 0.5 となるときのせん断ひず み、 h_{max} :最大減衰定数である。なお、 G_0 は地盤密度を ρ 、せん断波速度を Vsとして ρVs^2 から算定した。

2.2 解析モデル

本検討では、不整形状がそれぞれ異なる複数のモデ ルを作成した。地盤の物性値と土の履歴モデルに用いた パラメータを表1に、作成したモデルの一例を図1に示 す。なお、各解析モデルで物性値は共通である。表層地 盤は粘性土を仮定し、修正 R-O モデルのパラメータで あるy0.5 と hmax には粘性土の平均値とされている 0.18% と 17%²⁾を用いた。また、境界条件は底面、側方ともに 粘性境界とした。

表1 解析モデルの諸元

	Vs (m/sec)	密度 (t/m ³)	初期材料 減衰h(%)	基準ひずみ γ0.5(%)	最大減衰定数 h _{max} (%)
表層	160	1.5	2	0.19	17
基盤	400	2	Z	0.18	17

名古屋大学工学部環境土木・建築学科建築学コース

護研究室 河野優

図 1 解析モデルの例

2.3 入力地震波

入力地震波にはレベル2相当の告示スペクトルと JMAkobe 位相(1995年兵庫県南部地震)を用いて作成さ れた地震波を基準として、加速度振幅レベルを1倍、 1.5倍、2倍したものを使用する。入力地震波の時刻歴 加速度波形と減衰5%の加速度応答スペクトルを図2に 示す。

図 2 入力地震波の時刻歴加速度波形と 5%減衰加速度

応答スペクトル

2.4 解析結果

基盤面に対する地表面の伝達関数と表層地盤の最大 加速度応答と最大ひずみ応答を評価する地点を図3に示 す。

解析結果を図 4~図 10 に示す。各図中の入力1と2は 入力地震波を1倍、2倍したもの、成層、不整形はそれ ぞれ1次元モデル、2次元モデルを、L、NLは線形解析 と非線形解析を表す。また、図4は線形解析による結果 であり、図5と図7~図10は非線形解析による結果であ る。

図4では1次元モデルと2次元モデルの振動数特性に どのような違いがあるかを確認するため、地点1と地点 4において線形解析を行い、1次元モデルと2次元モデ ルで伝達関数を比較した、その結果、成層に近い地点1 では卓越振動数に変化は見られないが地点4において卓 越振動数が高振動数側へシフトしており、地盤の不整形 性が卓越振動数に影響を与えていることが確認された。

図5では各地点での深さ方向の最大加速度応答と最大 ひずみ応答の分布を、1次元モデルと合わせて比較し た、その結果、1次元モデルではインピーダンスの影響 により層境界でひずみが増幅しているのに対し、2次元 モデルでは基盤によって深部でのひずみは拘束され谷の 中心部でのひずみの増大が見られた、それによって地中 での加速度も1次元モデルと比べて大きくなっており、 地表面加速度も大きい結果となっている。また基盤の傾 斜の始まる地点2では、ほかの表層地盤の層厚が同じと ころに比べてひずみが大きくなっていることを確認し た。

Ē

図6では地点4における非線形及び不整形による影響 を見るために地点4の地表面での線形解析と非線形解析 で得られた加速度のフーリエスペクトル比を示した。図 には、1次元モデルと2次元モデルでの結果を示してい るこれにより、1次元モデルでは、1Hz、7.5Hz、9Hz、2 次元モデルでは、2Hz、6Hz、9Hz にピークが認めら れ、非線形性によって増幅しやすい地震動の振動数がモ デルにより異なっていることが確認された。

図7と図8では非線形を考慮した各地点での振動数特 性を調べた。その結果、地表面から基盤までの層厚が大 きい地点ほど地盤の卓越振動数は低振動数側にあること が示され、線形解析と比べた場合でも卓越振動数が低振 動数側であること、入力地震波のレベルが大きくなれば それがさらに低振動数側へシフトしていくという結果が 得られた。

図9と図10では地点2と地点4でそれぞれ1次元モ デル、2次元モデルでの伝達関数を比較している、その 結果、入力地震波のレベルが大きくなると図4からわか るようにひずみはより増加するが、ひずみの増分に対し て卓越振動数の低振動数側へのシフトの幅の大きさはあ まり見られなかった。

3 まとめ

本検討では、土の履歴モデルに修正 R-O モデルを用い て、不整形地盤対して線形解析及び非線形解析を実施し、 入力地震波のレベルも変えながら、それぞれの地点での 地表における応答特性の比較、及び最大加速度応答や最 大ひずみ応答の比較を行った。その結果、修正 R-O モデ ルにおいては1次元、2次元モデルに関わらず1.5%程度 のひずみであれば非線形化に伴う卓越振動数の変化の差 はあまり見られないことを確認した。

今後は、実際の地盤データを参照しながら、より実地 盤に近いモデルで検討を行うとともに、地盤の復元力特 性の違いによる影響や長周期地震動のような位相特性の 異なる入力地震動による影響等についても検討を行う。 参考文献

- 足立紀尚、龍岡文夫:新体系土木工学 18、土の力学 1) (III)、 244-250、技報堂出版 1981
- 2) 古山田耕司、宮本裕司、三浦賢治:多地点での原位置採 取試料から評価した表層地盤の非線形特性、第38 回地盤 工学研究発表会、2077-2078、2003.7

図 3 解析地点

