

表層地盤の非線形性と不整形性が応答性状に与える影響

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2 年 護研究室 河野優
で表される。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.5}} \right|} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 τ ：せん断応力である。

3. 2 層成層地盤の地震応答に解析手法や履歴モデルが与える影響

本章では表層と基盤からなる 2 層成層地盤を想定したモデルに対して 1 次元解析を行い、解析手法や履歴モデルが地震応答解析結果に与える影響について分析を行う。解析手法には重複反射理論に基づく等価線形解析(以下、SHAKE)と土の履歴モデルに修正 R-O モデルと修正 H-D モデルを適用した逐次非線形解析の 3 つの手法を用いた。

3.1 解析条件および物性

地盤の物性と土の履歴モデルに用いたパラメータを表 1 に示す。表層、基盤ともに粘性土と仮定し基準ひずみ及び最大減衰定数には粘性土の平均値³⁾を用いている。なお、本検討においては塑性指数及び拘束圧は考慮しないこととし、非常に理想化された地盤をモデル化している。逐次非線形解析の数値計算には Newmark- β 法($\beta = 1/4$)を用い、減衰はレーリー減衰として、1Hz と 20Hz で 2%となるように設定した。

表 1 物性値諸元及び土の履歴モデルのパラメータ

	表層地盤 の厚さ(m)	V_s (m/sec)	密度 (t/m^3)	表層地盤の 履歴モデル	初期材料減衰 h(%)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	最大減衰定数 h_{max} (%)
表層	40	160	1.5	等価線形 R-Oモデル	2	0.0018	17
基盤		400	1.5	H-Dモデル		0.0018	-

3.2 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 JMA 神戸位相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それぞれ 1 倍、2 倍したものを用いる。振幅レベル 1 倍の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 1 に示す。

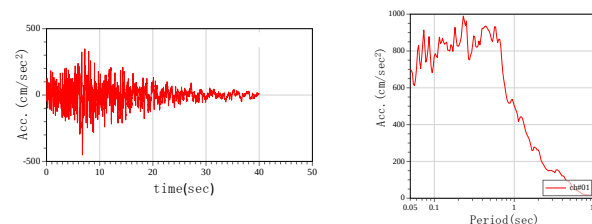


図 1 入力地震波の時刻歴加速度波形及び 5%減衰加速度応答スペクトル

3.3 解析結果

各入力地震波における深さ方向の最大加速度分布と最大せん断ひずみ分布を示したものを図 2、図 3 に示す。また、図 4 に SHAKE、修正 R-O モデル、修正 H-D モデルにおける $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を示したものを示す。併せて本検討で用いた基準ひずみの値を黒線で示してある。SHAKE および修正 H-D モデルの $G/G_0 \sim \gamma$ 関係は同じ骨格

1. 研究の背景と目的

ハザード評価等において表層地盤の地震応答解析を実施する場合には、等価線形解析や逐次非線形解析が比較的良好に用いられる。しかし、これらの手法は 1 次元の解析になるので、平行成層地盤を仮定していることになり、地盤が不整形を有している場合、応答は異なることが考えられる。また、地盤材料である土は非線形性を強く示し、その動的性質はひずみレベルに依存する。そのため、一般的に軟弱であるとされる表層地盤の地震応答解析では土の非線形性を考慮する必要がある。想定される南海トラフ地震の中にはレベル 2、またはそれを超えるようなものもあり、そのような強い地震動では土は非線形化し、地表面の応答にも影響を及ぼすことが考えられる。それに加えて、地盤が不整形を有していたとすれば、不整形の形状によって、ひずみの進展しやすい地点や逆に進展しにくい地点が発生することで、地盤はより複雑な挙動を示し、1 次元モデルのみでは評価できないことが考えられる。

本論文では、表層地盤において告示レベル 2 あるいはそれを超えるような大地震時の、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地震応答解析を実施し、土の非線形性や地盤の不整形性が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、1 次元モデルの適応性についての検討を行う。

2. 本検討で用いる土の履歴モデル

2.1 修正 Ramberg-Osgood 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の 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。

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

$$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{0.5} G_0} \right)^\beta \quad \text{式(2)}$$

$$\beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}} \quad \text{式(3)}$$

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、 h_{max} ：最大減衰定数、 $\gamma_{0.5}$ ： G/G_0 が 0.5 となるときのせん断ひずみである。

2.2 修正 Hardin-Drnevich モデル

修正 Hardin-Drnevich モデル²⁾(以下、修正 H-D モデル)は、土の静的な応力-ひずみ関係によく用いられている双曲線モデルをそのまま骨格曲線に使い、Masing 則により履歴曲線を作成したもの³⁾のことをいう。骨格曲線は以下

曲線の式を用いているため重なっている。

本検討では表層、基盤ともに一様地盤としているため、全てのケースにおいて層境界部でひずみが大きく、地盤免震的に地表面で加速度の増幅が見られない結果となっている。また、地震動の入力レベルが大きくなるほど各手法においてひずみ、加速度の差が顕著に表れる結果となっている。入力レベルが1倍のケースでは各手法、履歴モデルについてせん断ひずみに大きな差はない。一方、加速度を見ると修正 H-D モデルで SHAKE、修正 R-O モデルと比べて地表面の応答は小さい。これは、図4から基準ひずみよりも大きい範囲では同じせん断ひずみであっても修正 R-O モデルと比べて剛性低下が SHAKE および修正 H-D モデルで大きく、かつ修正 H-D モデルは最大減衰定数が定められていないため SHAKE と比べて減衰が大きくなったためであると考えられる。入力レベルが2倍になると修正 R-O モデルで最大ひずみが0.8%であるのに対して SHAKE はその約2倍の1.7%、修正 H-D モデルで2%を超えるひずみの値を示した。また地表面加速度では修正 H-D モデルに対し修正 R-O モデルで2倍ほど大きく、より剛性の低下、減衰の増大の差による影響が大きく表れる結果となった。

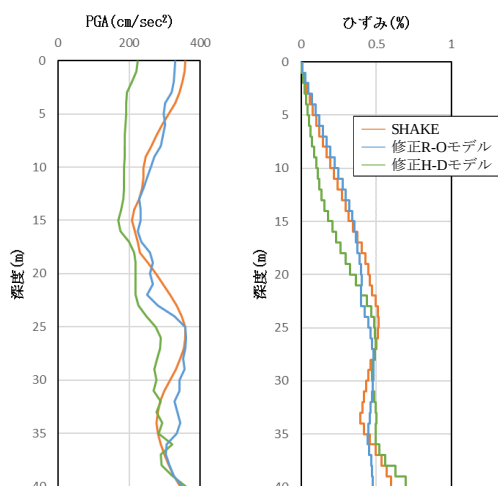


図2 PGAとひずみ分布(入力レベル1倍)

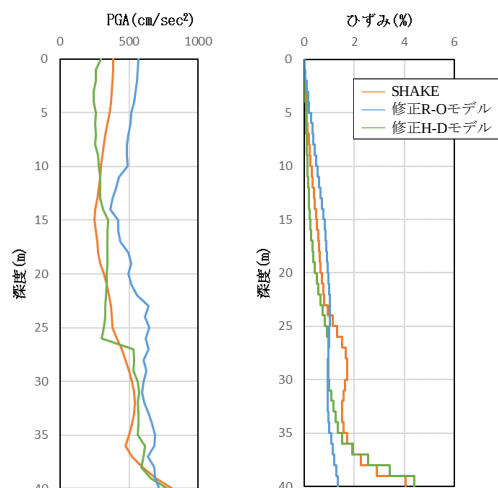


図3 PGAとひずみ分布(入力レベル2倍)

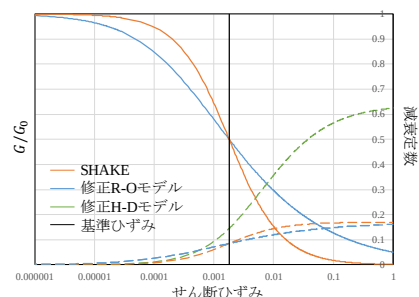


図4 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係

4. 表層地盤の不整形性や地震動が応答性状に与える影響

本章では2次元FEMを用いて不整形地盤における基盤の傾斜角や基盤底面の長さ、入力地震動の振幅レベル等をパラメータとして地震応答解析を実施し、不整形性や非線形性が応答性状に与える影響について分析を行う。

4.1 モデル及びパラメータの概要

4.1.1 解析モデルの作成

本検討では「名古屋地域地質断面図集」³⁾を参考に、図5のように基盤が盆地の形状となっており、そこに土砂等が堆積して形成されている箇所を不整形地盤として抽出した。

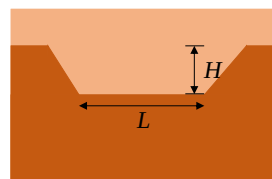


図5 抽出した不整形地盤のイメージ

また、抽出したエリアについてアスペクト比(H/L)と基盤の底面の長さ L の関係を調べ、微地形区分図と照らし合わせたものが図6である。谷の底面の長さが50~160mの範囲は自然堆積によって形成されたエリアで、200~600mの長さの地域は自然堆積かつ埋立や盛土によって形成されたエリアであった。

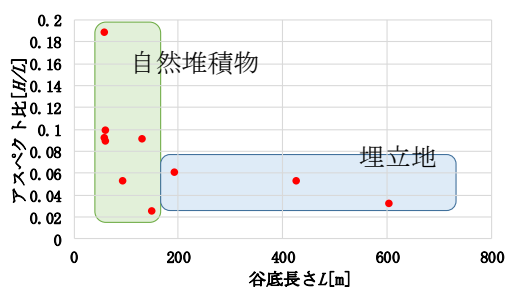


図6 谷底長さ L とアスペクト比 H/L の関係

4.1.2 モデルの物性値及び解析条件

モデルは単純のため表層と基盤からなる2層地盤とし、表層地盤の V_s 速度を160m/sec、密度を1.5t/m³、基盤の V_s 速度を400m/sec、密度を2.0t/m³とした。また、非線形解析には修正 Ramberg-Osgood モデルを用い、表層地盤、基盤とも粘性土と仮定し、パラメータとして基準ひずみに0.18%、最大減衰定数に17%を与えた。表2に物性値の諸元を示す。時刻歴の数値計算では Newmark- β

法($\beta = 1/4$)を用い積分時間間隔を 0.002 秒とした。また、減衰はレーリー減衰として、1Hz と 20Hz で 2%となるように設定した。モデル側面および底面には粘性境界を用いて地震波の逸散を考慮している。

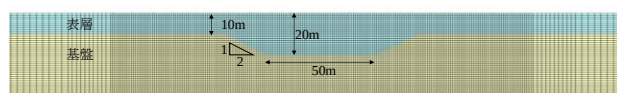
表 2 物性値諸元

	V_s (m/sec)	密度 (t/m^3)	履歴モデル	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	最大減衰定数 $h_{max}(\%)$
表層	160	1.5	修正R-Oモデル	0.0018	17
基盤	400	2			

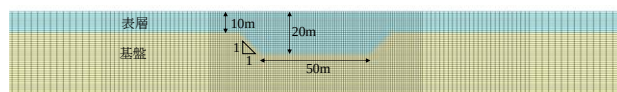
4.2 基盤の傾斜角が応答に与える影響

4.2.1 解析モデル

作成したモデルを図 7 に示す。表層地盤の層厚は最浅部で 10m、最深部で 20m とし、それぞれの表層厚で 1 次元モデルとしたとき、4 分の 1 波長則より 1 次の卓越振動数は最浅部で 4Hz、最深部で 2Hz となっている。また、基盤底部の長さ L は 50m、基盤傾斜を縦:横で 1:2、1:1 の比となるようにし計 2 ケースで時刻歴非線形解析を実施した。また、表層厚が 20m の 1 次元モデルにおいても同様の解析を行い 2 次元モデルとの比較を行った。



基盤傾斜 1:1



基盤傾斜 1:2

図 7 解析モデル

4.2.2 入力地震波

入力地震波には第 3 章の検討で用いたものと同じ告示レベル 2 相当のスペクトルに JMA 神戸位相を用いて作成された地震動(振幅レベル 1 倍)を用い、P-SV 波として入射し面内応答を評価した。

4.2.3 解析結果

それぞれのモデルにおける基盤傾斜下端部を $x=0m$ にとり盆地の中心を正として水平方向について地表面から深さ 5m 毎の最大ひずみ及び最大加速度の値をプロットしたものを図 8 に示す。また、グラフの右側には 1 次元モデルの結果も併せて示してある。基盤傾斜 1:2、1:1 どちらのモデルにおいても層境界部(GL-20m)における谷の中心部付近($x=25m$)で最大ひずみが 1 次元モデルよりも大きく、最大加速度についても 1 次元モデルより大きくなっており、第 3 章で述べた層境界でひずみが増大することで地表面加速度が小さくなる地盤免震効果の影響は小さくなっており、不整形地盤の増幅特性によって加速度が 1 次元モデルよりも大きくなったことが考えられる。一方、基盤傾斜部付近($x=0m$)では基盤傾斜によって表層地盤の変形が抑制され層境界におけるひずみは 1 次元モデルよりも小さくなっている。また、同地点において基盤傾斜 1:1 よりも 1:2 のモデルでひずみが大きいことから、傾斜角が大きくなるとひずみの拘束効果が大き

くなることが示された。一方、傾斜角の違いによる加速度の違いに大きな差は見られなかった。

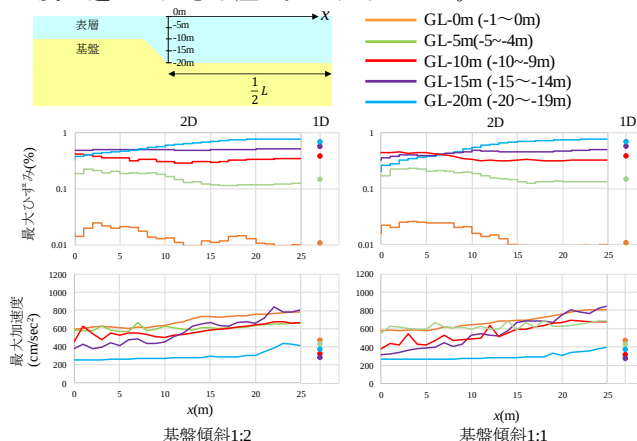


図 8 深さ 5m 毎における水平方向の最大応答値

4.3 基盤底面の長さが応答に与える影響

4.3.1 解析モデル

作成したモデルを図 9 に示す。基盤傾斜は 1:1 として基盤底面の長さを L として $L=50m$ 、 $100m$ 、 $150m$ の計 3 つのモデルで検討を行った。

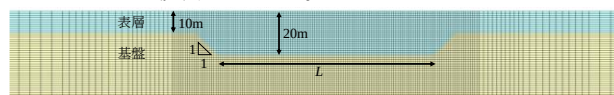


図 9 解析モデル

4.3.2 入力地震波

入力地震波は 4.2 節と同様のものを用い、P-SV 波として入射し面内応答を評価した。

4.3.3 解析結果

図 8 と同様のグラフで $L=100m$ と $150m$ についての結果を示したものを図 10 に示す。図 8 および図 10 について地表面の加速度を見ると、どのモデルにおいても地表面加速度は 1 次元モデルよりも大きな値を示している。また、基盤底面の長さが短いほど谷の中心部に近づくにつれ応答が大きくなり $L=50m$ のモデルでは谷中心部($x=25m$)で 1 次元モデルに対し 1.8 倍程度大きな加速度を示した。ひずみでは基盤底面の長さが長くなるほど谷の中心部での層境界(GL-20m)のひずみは大きくなっていることから、基盤底面の長さが長くなるほど谷の中心部における地表面の最大加速度は小さくなり、地盤免震的な効果の影響を受けやすくなっていることが示唆された。

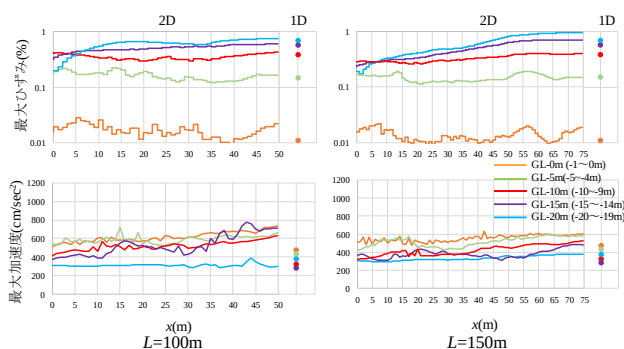


図 10 深さ 5m 毎における水平方向の最大値

4.4 表層地盤の層厚が応答に与える影響

4.4.1 解析モデル

本検討では、基盤傾斜は1箇所として、基盤の傾斜角を 90° 、表層地盤最深部の厚さを20mとして、最浅部の厚さをそれぞれ8m、10m、13m、15mとした計4つのモデルで時刻歴線形解析を実施した。解析モデルを図11に示す。

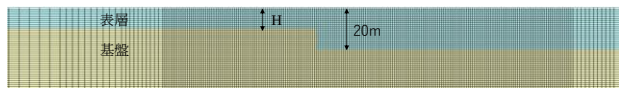


図11 解析モデル

4.4.2 入力地震波

入力地震波はリッカーウェーブレット(中心振動数2Hz)を用い、P-SV波として入射し面内応答を評価した。時刻歴波形及びフーリエスペクトルを図12に示す。

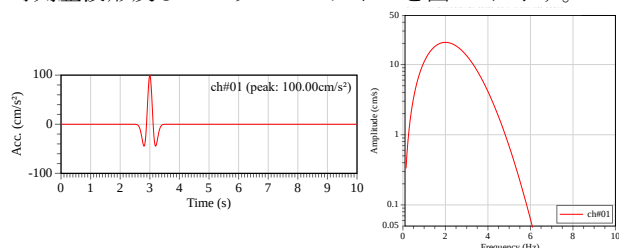


図12 リッカーウェーブレット

4.4.3 解析結果

表層浅部厚の異なる4つのモデルにおける基盤傾斜直上部の地表面の伝達関数($2E/2E$)と、1次元モデル(表層厚20m)の伝達関数($2E/2E$)を重ね描いたものを図13に示す。それぞれ浅い層厚のほうから5Hz、4Hz、3.08Hz、2.67Hz、で増幅しており、浅部厚の影響によるものであると考えられる。図14に重複反射理論を用いて式(5)のように浅部厚と深部厚で平均化を行った際の伝達関数を示す。図13と比較するとどのモデルにおいても2Hzにおける増幅は平均化を行ったものが大きいなどの差はあるが基盤傾斜直上部は1次元モデルで平均化を行ったものとおおよそ形状が一致する傾向が見られることを確認した。

$$H(\omega) = \left(\frac{2E_{H=浅部厚}}{2E} + \frac{2E_{H=20m}}{2E} \right) / 2 \quad \text{式(5)}$$

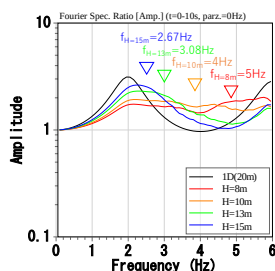
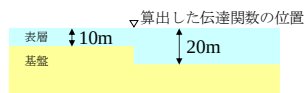


図13 伝達関数(解析)

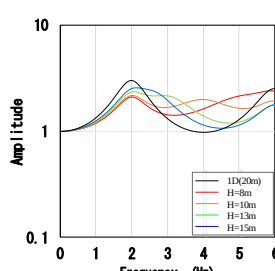


図14 伝達関数(平均化)

4.5 地震動の振幅レベルが非線形性に与える影響

4.5.1 解析モデル

解析モデルには図7における基盤傾斜1:1モデルを用

いる。

4.5.2 入力地震波

入力地震波は4.2節で用いたものに加えて、その地震波の振幅レベルを2倍した計2波をP-SV波として入射し、面内応答を評価した。

4.5.3 解析結果

図15に図8と同様、振幅レベル2倍時の結果を示す。図8と図15を比較すると、振幅レベル1倍時では $x=25m$ の層境界におけるひずみは0.77%であったが振幅レベル2倍になると1.82%とひずみがより進展していることが確認された。また、同地点における加速度を見ると振幅レベル1倍時では1.8倍1次元モデルよりも大きい結果となっていたが、振幅レベル2倍では2次元モデルで1次元モデルと比較して1.68倍の増加となっており、入力レベルが大きくなり、よりひずみが進展することで1次元モデルに対する応答が低下したと考えられる。一方、基盤の傾斜によってひずみの抑えられている $x=0m$ の地点では、振幅レベル1倍時ひずみは0.2%と $x=25m$ の地点と比べて小さく、振幅レベル2倍時でも0.46%という値であった。加速度については振幅レベル1倍で1次元モデルに対して1.17倍となっており、振幅レベル2倍時でも同じ1.17倍となっていることから振幅レベルが異なってもひずみが拘束され非線形化があまり進まない範囲では1次元モデルに対する増幅に差が見られないことを確認した。

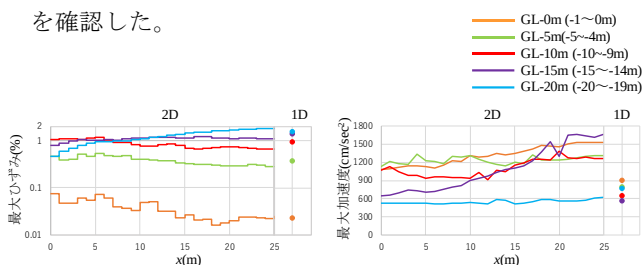


図15 深さ5m毎における水平方向の最大値(振幅レベル2倍)

5 まとめ

基盤傾斜角や基盤底面長さ等をパラメータとして不整形地盤に対し地震応答解析を実施し、1次元モデルの結果と比較し、1次元モデルの適用性についての検討を行った。今後の課題として入力に異なる位相特性を持つ地震波を用いて位相特性の違いによる応答性状の変化を比較することや多層地盤における検討を行うことが挙げられる。

参考文献

- 1) 足立紀尚・龍岡文夫：新体系土工学 18、土の力学(III)、技報堂出版、pp.244-250,1981
- 2) 國生剛治・桜井彰雄：Modified Hardin-Drnevich モデルについて、土木学会第33回年次学術講演会講演概要集、土木学会、第3部門、pp.1811-1814,1979
- 3) 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、pp.2077-2078,2003.7
- 4) 「名古屋地域地質断面図集」土質工学会中部支部名古屋地盤図委員会資料部会地質グループ 編著(1987) 名古屋地盤図出版会