

# 多次元地震応答解析による Rayleigh 波・Love 波の再現と表層地盤被害に及ぼす影響

地震応答解析, 地層不整形, 表面波

名古屋大学 ○中井健太郎, 野田利弘, 鈴木彩華  
地震予知総合研究振興会 浅岡顕

## 1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)では, 住宅被害が震源断層の直上から離れた六甲山南麓の狭い地域に帯状に集中した. いわゆる「震災の帯」であるが, 地震被害が局所化した原因は, 堆積層を通過した実体波が, 六甲山地から大阪湾にかけて岩盤が大きく沈みこんだ不整形な地下構造に由来する山側岩盤端部で生成された表面波と地表の特定位置で干渉・増幅したため(「エッジ効果<sup>1)</sup>」)とされている. このように, 不整形地盤が起因して地震被害が甚大化・局所化した類似例も報告されているが, 実際の地震観測記録から表面波のみを抽出することは難しく, 表面波が表層地盤の被害に与える影響は未だ十分には解明されていない. 地表震度や液状化などのハザードマップの多くは, 等価線形解析または非線形解析(全応力解析)が一通り実施されているものの, 経験的な  $N$  値とせん断波速度  $V_s$  の関係式に基づく鉛直一次元弾性計算から求めていることがほとんどである. このため, これらの検討では, 地中の不整形な地層・基盤構造による表面波生成などの多次元効果が考慮されておらず, 地震被害を過小評価している危険性がある. 本稿では, 地層の不整形性を考慮した三次元を含む地震応答解析を実施し, 不整形基盤から生成される表面波(Rayleigh 波・Love 波)を数値的に再現するとともに, 弾塑性解析によって表層地盤被害へ及ぼす影響を検討する. 用いた解析コードは, 砂から中間土, 粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式(SYS カムクレイモデル<sup>2)</sup>)を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>3)</sup> である.

## 2. 不整形な弾性地盤の地震応答解析による表面波(Rayleigh 波・Love 波)の再現

解析モデルを図1に示す. 縦50m, 幅55,000mの地盤モデルを作製し, 左端2,220m位置から基盤の傾斜を設けた. 本稿では傾斜角が5度の例を示す. 表面波の再現解析は理論解と比較検証できるように, まず一相系線形弾性体の微小変形解析を実施した. なお, ここでは重力の影響は考慮していない. この地盤に対し, Kik-net 益城で観測された熊本地震波(2016)を2E波と見做し, 下端全節点に対して, 1) 水平方向( $x$ 方向)および2) 紙面奥行き方向( $y$ 方向)に等しく入力した. Rayleigh 波の再現に相当する1)では, 地盤底面全節点に堆積層と等しい  $V_s=60\text{m/s}$  に相当する粘性境界を与え, 半無限弾性地盤を仮定した. 一方, Love 波の再現に相当する2)では, 二層系弾性地盤を想定し, 地盤底面全節点に基盤と等しい  $V_s=2,000\text{m/s}$  に相当する粘性境界を設定した. 地震時は境界両側端で側方境界要素単純せん断変形境界を設定するとともに, 前面と背面には周期境界を設け, 紙面奥行き方向には同一地盤が周期的に続く状態を設定した.

傾斜基盤部周辺の速度ベクトルをそれぞれ図2, 3に示す. 1) 2)ともに, 傾斜基盤部から表層を伝播する波群が生成される. 紙面の都合から詳細は省略するが, 1)の場合, ①半無限一層地盤の場合は単一周期の規則波である, ②表層で変位が大きく深部ほど小さくなる, ③地表面で反時計回りの軌跡を描くが深部では時計回りとなる, ④多層地盤の場合は波の分散が観察されるなど, Rayleigh 波の弾性理論解の特徴を再現していることを確認した. 一方, 2)の場合, ①地表面と平行( $y$ 方向)の成分のみを有する波が励起され, ②伝播とともに分散性を示す, ③一層系の半無限地盤ではこのような波は発生しないなど, 理論的に得られる Love 波の特徴を再現していることを確認した.

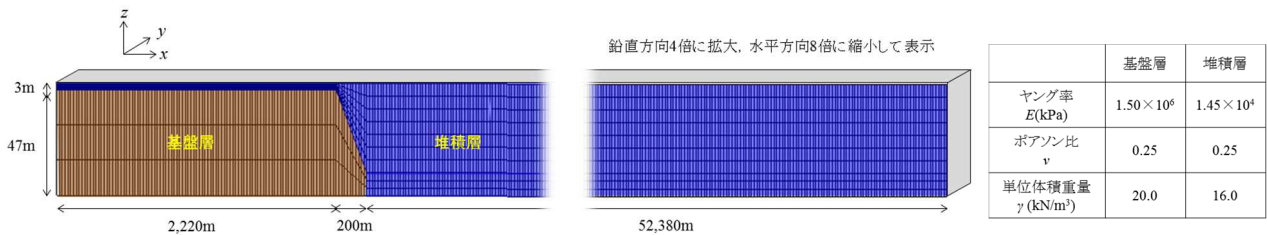


図1 解析モデル

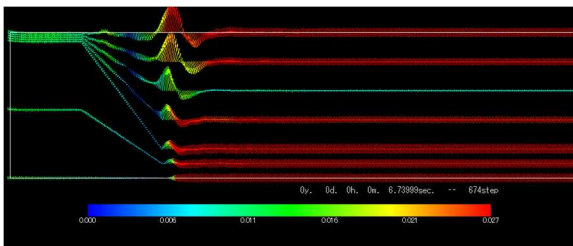


図2 Rayleigh 波の再現 (速度ベクトル)

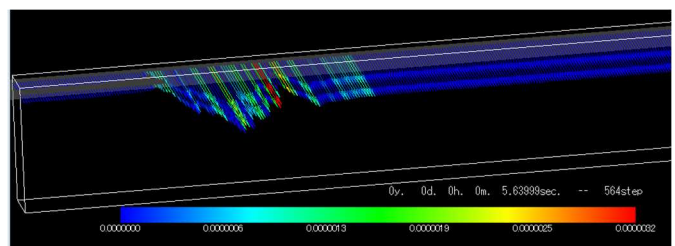


図3 Love 波の再現 (速度ベクトル)

Numerical reproduction of Rayleigh and Love waves and assessment of their influences on subsurface damage based on multi-dimensional seismic response analysis. Nakai, K., Noda, T., Suzuki, A. (Nagoya University) and Asaoka, A. (ADEP)

### 3. 弾塑性地震応答解析による表面波が盆地の表層地盤の変状に及ぼす影響

2. では、地盤の不整形性が起因して、傾斜基端部から表面波（Rayleigh 波と Love 波）が励起されることを確認した。そこで、図 4 に示すような、硬質な基盤に軟弱な粘性土が堆積した盆地形状を呈する地盤を想定して、表面波が表層地盤被害に及ぼす影響について水～土骨格二相系弾塑性体の有限変形解析によって検討した。解析に用いた材料定数は Nakai et al. (2015) を参照。底面および側面は非排水境界、上面は大気圧境界とし、地盤底面全節点に  $V_s=2,300\text{m/s}$  に相当する粘性境界を用いた。この地盤に、1) 水平  $x$  方向に熊本地震 EW 波、2) 奥行  $y$  方向に熊本地震 NS 波、3)  $x, y$  方向にそれぞれ熊本地震 EW, NS 波、の三種類の地震波を入力した。1) は Rayleigh 波、2) は Love 波、3) は Rayleigh 波と Love 波の両方が基盤傾斜部に励起されることとなる。

図 5 は、水平  $x$  方向のみに地震動を入力した時のせん断ひずみの経時変化である。地震発生後、せん断ひずみが左右の傾斜基端部から中央部へと進展しており、表面波が伝播する様子がわかる。また、不整形境界における実体波の屈折や、表面波と実体波の複雑な干渉が影響して、せん断ひずみ分布は非一様な様相を呈するとともに、局所的に大きくなる。図からはわかりにくいですが、地震後（圧密終了後）の地表面はがたつき、不等沈下を示す。2) 3) の際も、発生程度は異なるものの、ひずみ分布は不均一となる。図 6 は、図 4 内に矢印で示した地点における平均有効応力低下率であり、別途実施した次元解析結果も同時に示す。表面波は盆地内に滞留して長時間揺れ続けるため、多次元解析における平均有効応力低下率は次元解析よりも大きく、地震後も増加し続ける。1) 2) 3) で比較すると、本検討においては、平均有効応力

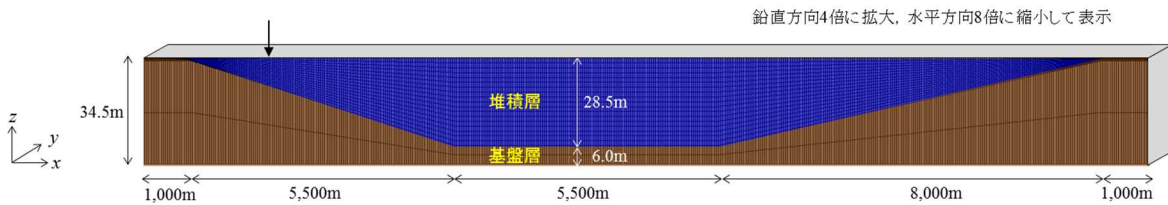


図 4 解析モデル（盆地形状）

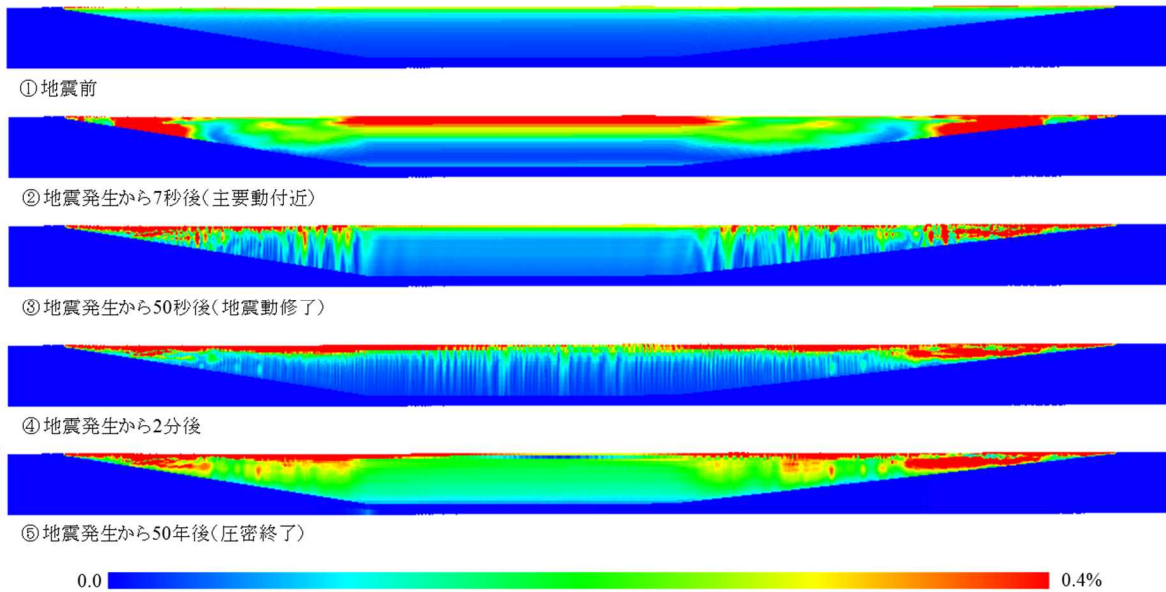


図 5 せん断ひずみの経時変化（水平  $x$  方向のみ地震動入力：Rayleigh 波の影響）

低下率への寄与度は Love 波よりも Rayleigh 波の方が高いことがわかる。

以上から、表面波の生成・伝播に代表される多次元効果は無視できる程度ではなく、より精緻かつ実情に合った被害予測のためには考慮すべき事項であることを示し、地層の不整形性を考慮した多次元有効応力解析の必要性和有用性を示唆した。

参考文献 1) 川瀬博, 松島信一: エッジ効果に着目した..., 地震, 50(4), 431-449, 1998. 2) Asaoka, A. et al.: An elasto-plastic description..., S&F, 42(5) 47-57, 2002. 3) Noda, T. et al.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on ..., S&F, 48(6), 771-790, 2008. 4) Nakai, K. et al. (2015): Liquefaction damage enhanced..., JGS Special Pub. 2(19), 723-728, 2015.

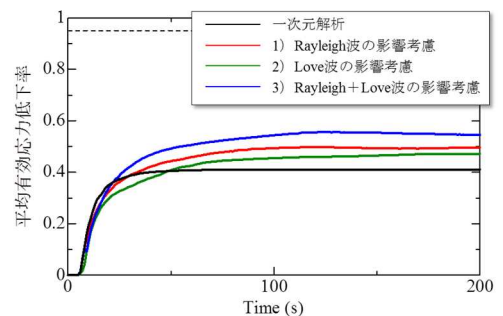


図 6 平均有効応力低下率の比較