

# 不整形基盤から生成される Rayleigh 波の水～土骨格連成有限変形解析による再現／抽出

名古屋大学 正会員 ○中井健太郎

名古屋大学 フェロー会員 野田利弘

地震予知総合研究振興会 フェロー会員 浅岡顕

## 1. はじめに

内閣府は平成 27 年 12 月に「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告」を取りまとめた<sup>1)</sup>。長周期地震動とは 2～10 秒程度のやや長周期の地震動のことであり、超高層建築物の長時間にわたる大きな揺れや石油タンクのスロッシングなど、共振による地震被害の拡大が懸念されている。この長周期地震動の主たる成分は、地表付近の硬質な基盤と軟弱な堆積層との不整形境界で生成される「表面波」であると言われている。表面波は伝達時の距離減衰が小さく、震源から遠く離れた地点にまで伝わるのが特徴である。本稿では、地層の不整形性を考慮した二次元弾塑性有効応力解析を実施し、不整形基盤から生成される表面波 (Rayleigh 波) を数値的に再現・抽出し、その特徴を把握することを目的とする。用いた解析コードは、土骨格の弾塑性構成式に 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. 解析条件

図 1 に解析モデル概略を示す。縦 100m、幅 30,000m の地盤モデルを作製した。浦安地盤を参考に、下部から硬質基盤、軟弱粘土、液状化危険度の高い砂質土とし、左端 2,700m 部の粘土層・基盤の境界に地層傾斜を設けた。本稿では傾斜角が 3° の例を示す。水理境界は、地表面が水位面と一致するよう水圧をゼロとし、下端と両側面は非排水とした。入力地震動を図 2 に示す。品川地震観測所の G.L.-36m 付近における東北地方太平洋沖地震の観測波 EW 成分を 2E 波と見做し、図 1 に示す加振領域の水平方向に等しく入力した。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、右端付近では反射波が生じないように、端部から幅 1,000m の領域において、躍度、加速度、速度の値を 1 秒毎に強制的にゼロにした。また、加振領域を含む地盤底面全節点に  $V_s=400\text{m/s}$  に相当する粘性境界を用いた。

## 3. 地震応答解析結果

図 3 は東北地方太平洋沖地震入力時の地震発生から 150 秒後における基盤傾斜部周辺の水～土骨格連成有限変形解析結果である。表層部において反時計回りに巻き上げるような表面波 (Rayleigh 波) の発生が確認できる。この Rayleigh 波は傾斜基端部で発生し、図中の右側へ進行していく。図 4 と図 5 に加振領域から 10,000m と 20,000m 離れた図 1 中の c、d 地点の地表面で観測される加速度特性を示す。水平・鉛直ともに最大で 20gal 程度の加速度が伝

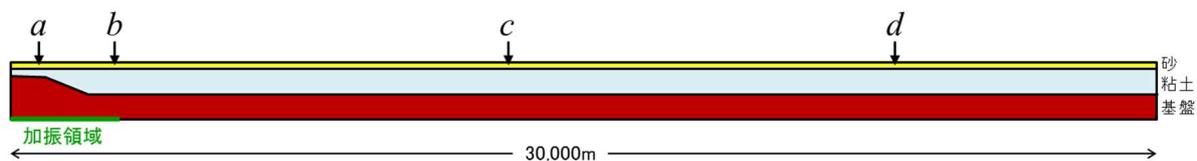


図 1 解析モデル(鉛直方向に 16 倍に拡大)

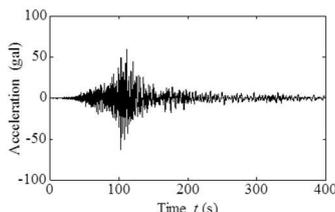


図 2 入力地震動

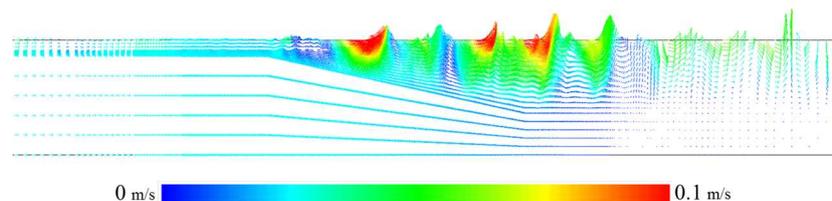
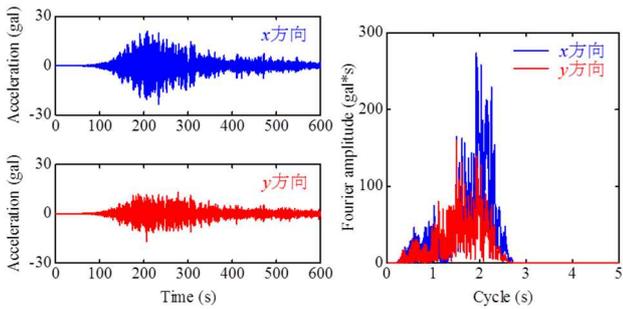


図 3 傾斜基端部における Rayleigh 波の生成(速度ベクトル分布)

地震応答解析, 表面波, 不整形基盤



(a) 地表面におけるx, y方向の加速度応答 (b) 地表面応答のフーリエ振幅スペクトル

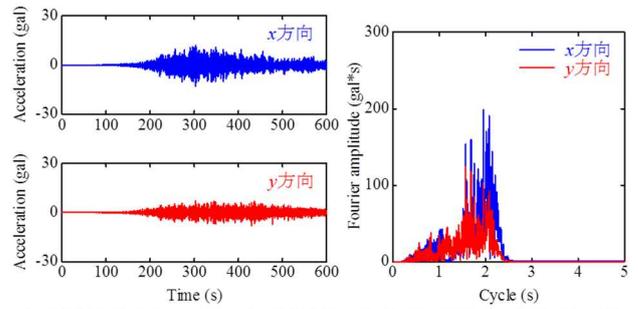
図4 c地点の地表面で観測される加速度特性

播している。両地点ともに、下端部における加速度応答はないため実体波の影響はほとんどなく、図4,5の抽出波は Rayleigh 波単体の波形だと判断できる。c地点とd地点で比較すると、d地点の方が波群が広がっているが、これは表面波が有する分散性(波長によって位相速度が異なる)に起因すると考えられる。Rayleigh 波に関しては半無限弾性地盤を仮定した理論解や観測データ・経験から、①距離減衰が小さいこと、②やや長周期成分が卓越すること、③表層で楕円の軌跡を描いて振動すること、④振幅は地表付近で最大で深度方向に急速に減少すること、⑤地震動の種別によらず似た波が発生すること、等が知られている。そこで本解析で抽出した波とその特徴を比較した。加速度応答に着目すると、表層砂質土の履歴減衰によって多少の減衰は見られるものの、c地点から10,000m離れたd地点においても、やや長周期成分を主とする比較的大きな加速度が伝播している。図6にはd地点における深度方向の最大変位分布および軌跡を示すが、軌跡が楕円軌道を描いていること、深くなるほど変位が小さくなるといった特徴が再現されている。図7には、同一地盤に兵庫県南部地震を入力した時のd地点における加速度応答を示す。最大加速度や継続時間は異なるが、周期特性の類似した波形が抽出された。以上から、理論解や観測データとの厳密な比較はできないものの、加振領域から離れた地点における抽出波は Rayleigh 波が有する特徴をよく再現している。

#### 4. おわりに

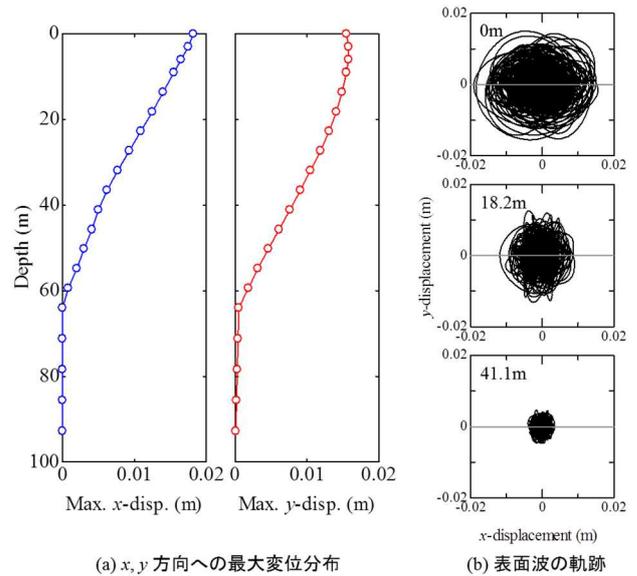
地層の不整形性を考慮した二次元弾塑性有効応力解析を実施したところ、加振領域から離れた地点で抽出した波形は Rayleigh 波の特徴を捉えていた。今後は、抽出した波の分散性や、d地点よりも遠方での波の抽出を進め、抽出波の特徴を詳細に比較・検討していく。また、地層構成や不整形性を系統的に変え、表面波の伝播が表層地盤やその上に建つ構造物の揺れへ与える影響を検討していく。

参考文献 1) 内閣府: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, 2015. 2) Asaoka, A. et al., An elasto-plastic description of two distinct volume change..., S&F, Vol 42, No.5, pp.47-57, 2002. 3) Noda, T. et al., Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion ..., S&F, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.



(a) 地表面におけるx, y方向の加速度応答 (b) 地表面応答のフーリエ振幅スペクトル

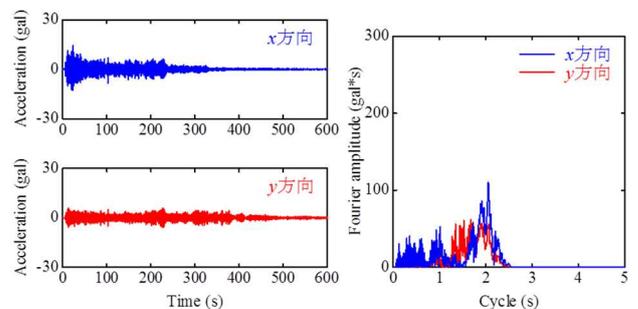
図5 d地点の地表面で観測される加速度特性



(a) x, y 方向への最大変位分布

(b) 表面波の軌跡

図6 抽出波の深度方向の最大変位分布と軌跡



(a) 地表面におけるx, y方向の加速度応答 (b) 地表面応答のフーリエ振幅スペクトル

図7 d地点の地表面で観測される加速度特性