

水～土骨格連成有限変形解析による表面波の再現／抽出と液状化被害に及ぼす影響

地震応答解析, 表面波, 液状化

名古屋大学 ○中井健太郎, 野田利弘, 尾崎奨
地震予知総合研究振興会 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¹⁾。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」と言われており, 表面波は伝達時の距離減衰が小さく, 震源から数百キロ離れた地点にまで伝わるのが特徴である。しかし, 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揺れや液状化被害に与える影響は未だ十分には解明されていない。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・抽出するとともに, 表層の液状化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²⁾) を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**³⁾ 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⁴⁾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. Rayleigh 波の数値的抽出とその特徴の把握

図 3 は地震入力から 150 秒後における基盤傾斜部周辺の数値ベクトル分布である。表層部において反時計回りに巻き上げるような Rayleigh 波の発生が確認できる。この Rayleigh 波は傾斜基端部で生成し, 図中の右側へ進行していく。図 4～図 7 に図 1 中の a～d 地点の地表面で観測される加速度特性を示す。加振領域直上の a 地点と b 地点における水平方向の最大加速度に大きな差異はない。しかし, a 地点では 1 秒以下の短周期成分が卓越しているのに対し, b 地点では厚く堆積した粘土層の通過に伴って 2 秒付近のやや長周期帯の加速度増幅が顕著である。また, b 地点では Rayleigh 波の影響で, 主要動終了後の 200 秒以降も比較的強い揺れが継続する「後揺れ現象」が生じていること, 地震入力は水平方向のみであるが鉛直動が発生していること, がわかる。続いて, 加振領域から 10,000m と 20,000m 離れた c 地点と d 地点を見ると, 水平・鉛直ともに最大で 20gal 程度の加速度が伝播している。両地点の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 6, 7 の抽出波は Rayleigh 波単体の波形だと判断できる。抽出した波形の加速度応答を見ると, 表層砂質土の塑性変形に伴う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, 2 秒付近の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。紙面の都合上図は省略するが, A) c, d 地点における軌跡が楕円軌道を描き, 深くなるほど変位が小さくなる, B) 兵庫県南部地震を入力した場合, 最大加速

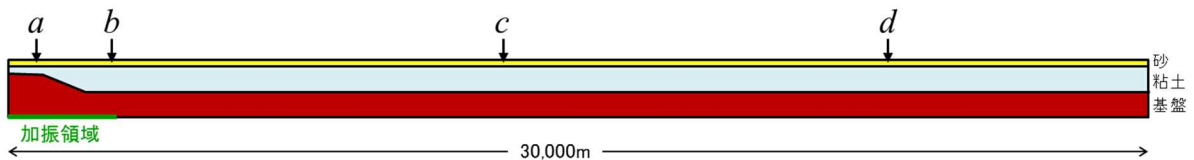


図 1 解析モデル(鉛直方向に 16 倍に拡大)

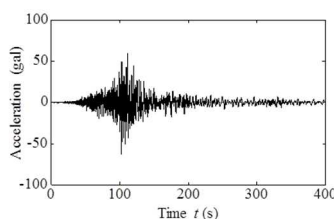


図 2 入力地震動

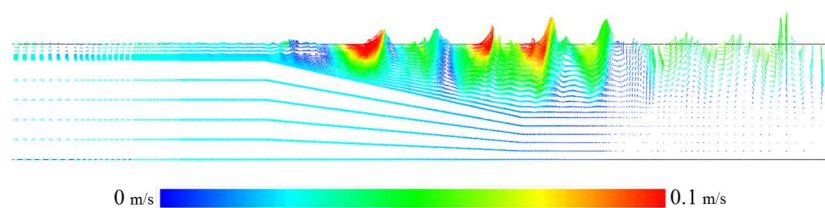


図 3 傾斜基端部における Rayleigh 波の生成(速度ベクトル分布)

度や継続時間は異なるものの、周期特性の類似した波形が抽出される、といった結果も得られた。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値から、①距離減衰が小さい、②やや長周期成分が卓越する、③表層で楕円の軌跡を描いて振動する、④振幅は地表付近で最大で深度方向に急速に減少する、⑤地震動の種別によらず似た波が発生する、といった特徴が知られている。理論解や観測データとの厳密な比較はできないものの、加振領域から十分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. Rayleigh 波が表層の液状化被害に及ぼす影響

図 8 に *a* ~ *d* 地点における表層砂質土の平均有効応力低下率を示す。傾斜基底部より左側に位置し、Rayleigh 波の影響が小さい *a* 地点では低下率が小さく、液状化していない。*b* 地点では初期の低下率が大きいことに加えて、傾斜基底部から伝播してくる Rayleigh 波と深部からの直達波が干渉することによって、主要動終了後の 200 秒以降も平均有効応力低下率が緩やかに増加を続け、最終的には 95% を超えて液状化にまで達する。Rayleigh 波のみが伝播する *c*, *d* 地点では、最大加速度は 20gal 程度と小さいにも関わらず、平均有効応力低下率は 40% まで徐々に増加する。両地点とも液状化にまでは達していないが、Rayleigh 波はやや長周期成分を多く含むため、液状化危険度を上昇させている。

5. おわりに

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 Rayleigh 波を数値的に再現・抽出し、表層地盤の液状化被害へ及ぼす影響を検討した。その結果、①加振領域から離れた地点で抽出した波形は Rayleigh 波の特徴をよく捉えていたこと、②Rayleigh 波伝播と直達波が干渉によって後揺れ現象が発生し、液状化危険度が高まること、③Rayleigh 波単体であっても平均有効応力低下率は大きく増加すること、を示した。既存の多くの被害予測手法は、実質的に地盤の非線形性を考慮していないだけでなく、鉛直一次元的な評価であるため、不整形な地層・基盤構造による多次元的な効果が考慮されていない。本稿の解析結果から、Rayleigh 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た。今後は、三次元解析を実施して、Rayleigh 波だけでなく Love 波の影響を把握するとともに、表面波の影響を従来予測法に取り込む方法について検討していく。

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 mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57, 2002. 3) Noda, T. et al.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *S&F*, **48**(6), 771-790, 2008. 4) Nakai, K. et al. (2015): Liquefaction damage enhanced by interference between body wave and induced surface wave on inclined bedrock, *JGS Special Pub.* 2(19), 723-728, 2015.

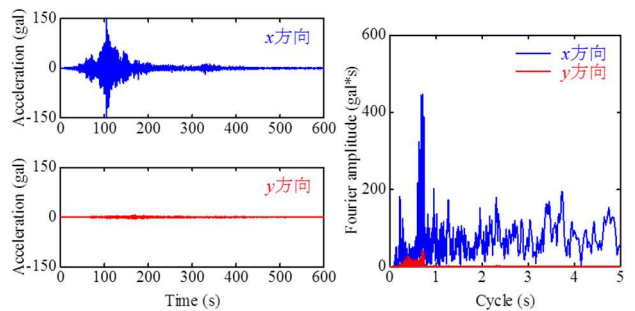


図 4 a 地点の地表面で観測される加速度特性

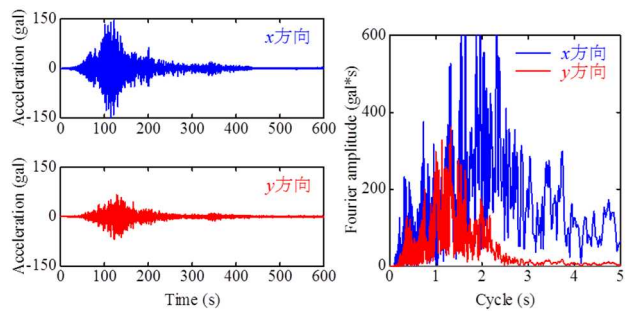


図 5 b 地点の地表面で観測される加速度特性

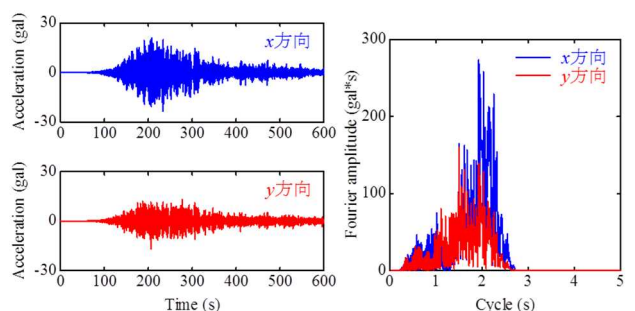


図 6 c 地点の地表面で観測される加速度特性

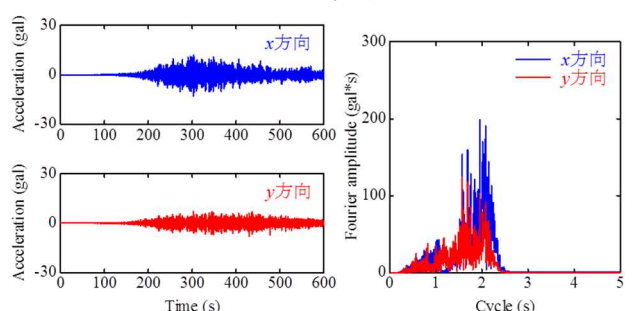


図 7 d 地点の地表面で観測される加速度特性

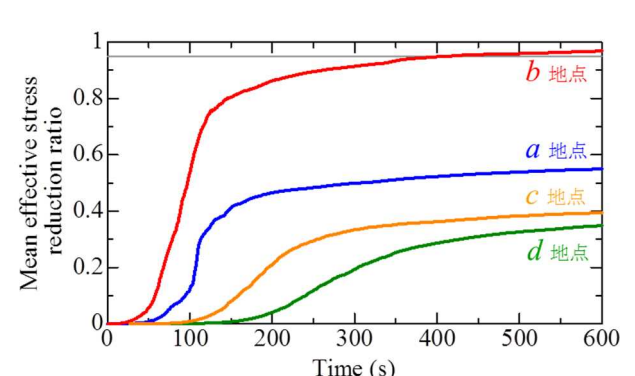


図 8 a ~ d の表層砂質土における平均有効応力低下率