

不整形基盤で生成された表面波と実体波の干渉による表層地盤被害の甚大化・局所化 Extensive and localized subsurface damage caused by the interference between body waves and surface waves generated from the irregularly shaped bedrock

中井 健太郎 (名大・工) 野田 利弘 (名大・工) 浅岡 颯 (ADEP)
Kentaro NAKAI, Nagoya University
Toshihiro NODA, Nagoya University
Akira ASAOKA, Association for the Development of Earthquake Prediction
FAX: 052-789-5203, E-mail: nakai@civil.nagoya-u.ac.jp

Most of the existing damage prediction methods not only do not substantially take account of the nonlinearity of the ground but also are based on one-dimensional vertical evaluations. Therefore, multi-dimensional effects due to an irregular stratigraphic and bedrock structure are not taken into consideration. In this paper, two-dimensional elasto-plastic effective stress analysis is carried out noticing the irregularity of the ground stratification. As a result, complex interference between the surface waves and body waves provides not only inhomogeneous deformation but also localized and extensive damage at the ground surface.

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⁾。この長周期地震動の主成分は、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」と言われている。これまで超高層建築物の長時間継続する大きな揺れや石油タンクのスロッシングなど、固有周期の大きい建築物の共振現象に伴う被害拡大については検討されはじめているが、長周期地震動（表面波）が、浅部地盤の地震被害に及ぼす影響はほとんど検討されていない。著者らは、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、傾斜基盤部で生成される波は、変位軌跡が反時計回りの楕円軌道を描くなど、弾性理論解や観測記録から得られる Rayleigh 波の特徴を捉えていること確認している²⁾。本稿では、この傾斜基盤部で生成される Rayleigh 波と実体波の複雑な干渉が、地震中～地震後の表層地盤の変状に及ぼす影響を数値的に検討した結果を示す。解析コードは、砂から粘土、中間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³⁾)を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁴⁾ である。

2. 解析条件

Fig. 1 に解析に用いた有限要素メッシュの概略図を示す。縦 50m、幅 54,600m の地盤モデルを作製し、左端 2,000m 地点から基盤層と堆積層の境界に 10 度の地層傾斜を設けた。

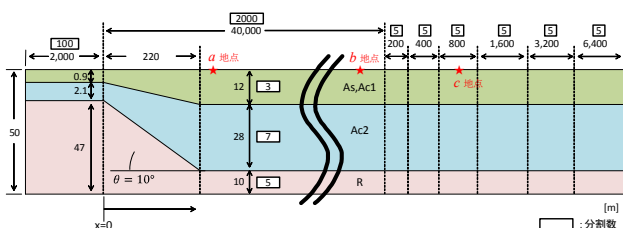


Fig.1 Model ground

堆積層は洪積粘性土と沖積砂質土の二層構造となっている。解析に用いた材料定数は、浦安地盤⁵⁾を参考に決定した。初期状態に関しては、同一層内で比体積・構造の程度・応力比・異方性の程度は均一とし、過圧密比を土被り圧に応じて分布させた。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。Fig. 2 に示す入力地震動は、KiK-net 益城観測点 G.L.-252m 地点における熊本地震波（2016 年 4 月 16 日）である。EW 成分を 2E 波と見做し、Fig. 1 の下端全節点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、地盤底面全節点に $V_s=450\text{m/s}$ に相当する粘性境界を用いた。

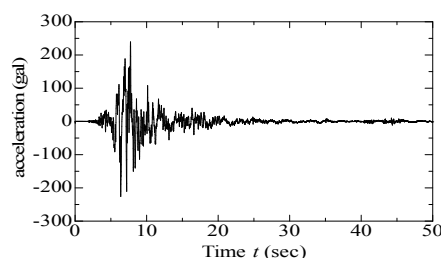


Fig. 2 Input seismic wave

3. 地震応答解析

Fig. 3 は地震発生から 20 秒後における基盤傾斜部周辺の速度ベクトル分布図、Fig. 4 は地表面における速度応答を傾斜基盤部からの離隔距離順に並べたものを示す。地震動は水平方向にのみ約 30 秒間入力しているが、30 秒以降も鉛直・水平方向に揺れながら、地盤右側方向へ伝播していく波群が観察される。詳細は割愛するが、この波群は分散性などの特徴から Rayleigh 波と考えることができる²⁾。また、Rayleigh 波よりも伝播速度が大きく減衰の大きい波も観察されるが、これは傾斜部に屈折した実体波である。

Fig. 5 に基盤傾斜部周辺における地表面速度応答の最大値分布を示す。図中には地震発生から 60 秒後のせん断ひずみ分布図も示している。鉛直・水平ともに傾斜基盤部より右側でピークを示し、局所的に揺れが大きくなっている。せん断ひずみも非一様に発生しているが、これらは Rayleigh 波と傾斜部に屈折した実体波の干渉の影響である。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、六甲山地から大阪湾にかけて岩盤が大きく沈みこんだ地下構造によって、山側岩盤端部で生成され水平に伝播した表面波と堆積層を通過した実体波とが地表の特定位置で干渉・増幅したため（「エッジ効果」）であると考えられてい

るが、Fig. 5はこのエッジ効果を再現している。続いてFig. 6は、Fig. 1中c, e, f点における平均有効応力低下率を示す。図中には一次元解析結果も同時に示している。Fig. 5で揺れの大きくなっているc点では、一次元解析結果よりも1割ほど平均有効応力低下率が高くなっており、液状化に近づいている様子がわかる。また、e点・f点においても、Rayleigh波が遅れて伝播してくることで地震終了後に、若干ではあるが、平均有効応力低下率が上昇している。最後にFig. 7は、傾斜部周辺の地表面沈下量分布である。せん断ひずみや速度応答と同様、非一様に沈下が発生し、傾斜基端部より400m地点で最大となる。沈下量がほぼ一定となる800m地点と比較すると、鉛直方向の地層構成は同一であるにも関わらず、沈下量は5倍程度大きい。800m地点の沈下量は一次元解析結果とほぼ等しいことから、地層不整形性を考慮することで、局所的に、鉛直一次的な評価に比べて大きな地盤変状が発生することを示している。

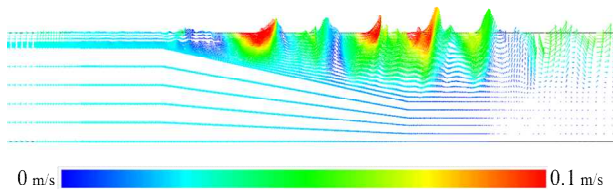


Fig. 3 Generation of surface waves at irregularly shaped bedrock

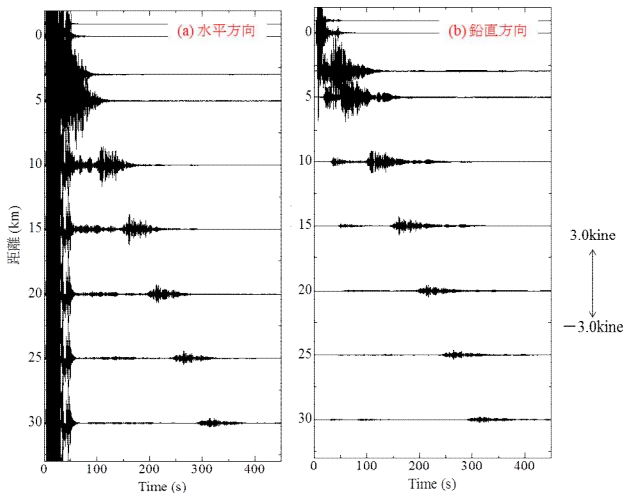


Fig. 4 Subsurface velocity response at different locations

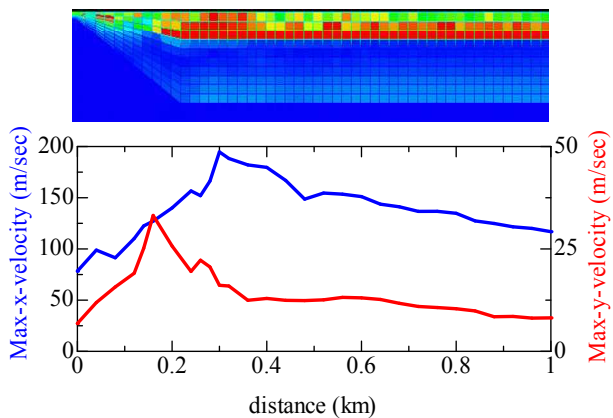


Fig.5 Maximum velocity at different locations

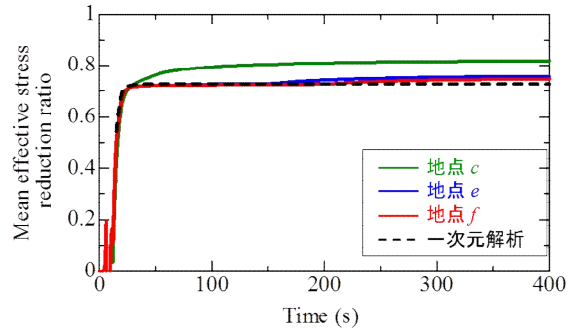


Fig.6 Mean effective stress reduction ratio at different locations

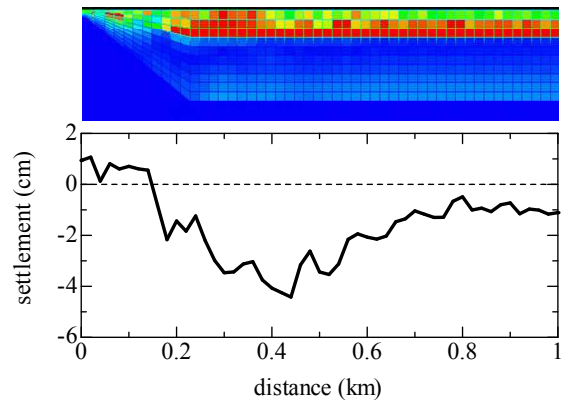


Fig. 7 Subsurface settlement at different locations

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、不整形基盤から生成されるRayleigh波と傾斜部で屈折した実体波の干渉によって、揺れや地盤変状が非一様化するとともに、局所的に大きくなることを示した。既存の多くの被害予測手法は、鉛直一次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。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) 中井健太郎ら, 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, 第71回土木学会年次学術講演会, pp.541-542, 2016.
- 3) Asaoka, A. et al., An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57, 2002.
- 4) 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.
- 5) Nakai, K. et al., Liquefaction damage enhanced by interference between body wave and induced surface wave on inclined bedrock, *JGS Special Pub.* **2**(19), 723-728, 2015.