

地層不整形性が地震中～地震後の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 国際会員 ○中井健太郎, 野田利弘

学生会員 中島努

地震予知総合研究振興会 国際会員 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¹⁾。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」と言われている。内閣府の報告では、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、傾斜基端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、この傾斜基端部で生成される 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。

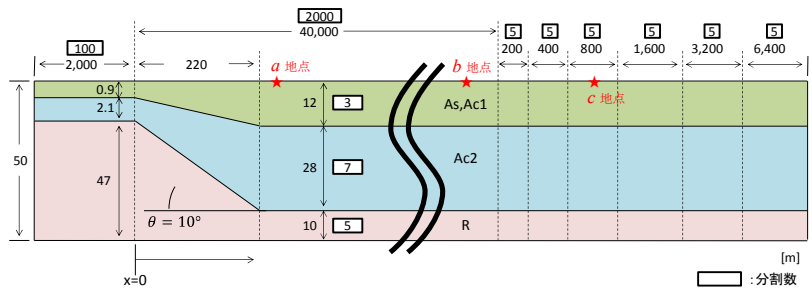


図 1 解析に用いた有限要素メッシュ

2. 解析条件

図 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。解析に用いた材料定数の一覧を表 1 に示す。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。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。入力地震動を図 2 に示す。本稿では、KiK-net 益城観測点における G.L.-252m 地点における熊本地震（2016 年 4 月 16 日）の EW 成分を 2E 波と見做し、図 1 の下端全節点の水平方向に等しく入力した結果を示す。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。

表 1 解析に用いた弾塑性性状

	基盤	洪積層	沖積層
	R	De	Ac1
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65		2.65
透水係数 k (cm/s)	1.0×10^{-7}		1.0×10^{-7}
弾塑性パラメータ			
限界状態定数 M	1.6		1.4
NCL の切片 N	1.627	3.77	3.27
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.005		0.24
膨潤指数 \bar{e}	0.00004		0.003
ポアソン比 ν	0.3		0.3
発展側パラメータ			
$-D_e^*$ と $\ D_e^*\ $ の割合 c_s	1.0		0.40
構造劣化指数 a ($b = c = 1$)	0.1		0.8
正規圧密土化指数 m	30.0		30.0
回転硬化指数 b_r	0.0		0.0
回転硬化限界面 m_b	1.0		1.0
初期値			
初期比体積 v_0	1.6		3.3
初期応力比 η_0	0.0		0.0
初期構造の程度 $1/R_0^*$	1.0		3.5
初期過圧密比 $1/R_0$	分布		分布
初期異方性の程度 ζ_0	0.0		0.0

3. 地震応答解析結果

3.1 Rayleigh 波の伝播の様子

図 3 は、地表面における速度応答を傾斜基端部からの離隔距離順に並べた。入力地震動は水平方向にのみ約 30 秒入力しているが、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速く減衰の大きい波も観測されるが、これは傾斜部で屈折した実体波である。

3.2 地層不整形性が地震中～地震後の地盤変状に及ぼす影響

図 4 は地震発生から 60 秒後の傾斜部付近のせん断ひずみ分布を示す。せん断ひずみは非一様に発生し、傾斜部より右側で局所的に大きくなっている。これは Rayleigh 波と傾斜部で屈折した実体波の干渉の影響である。図 5 は傾斜部種変における地表面速度応答の最大値分布である（水

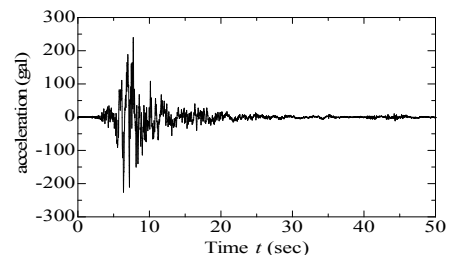


図 2 入力地震動

Effect of stratum irregularity on ground surface damage during/after the occurrence of an earthquake.

Nakai, K., Noda, T., Nakashima, T. (Nagoya University) and Asaoka, A. (ADEP)

平距離は図4と対応)。鉛直・水平ともに傾斜基端部より右側にピークを示し、局所的に揺れが大きくなっている。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、図4,5はこのエッジ効果を再現している。

図6は、傾斜部周辺の地表面沈下量分布である(水平距離は図4と対応)。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かかわらず、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、鉛直一次元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。

最後に図7は、図1中a～c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。a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、b点・c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。

4. 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) 中井健太郎, 野田利弘, 浅岡顕 (2016): 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. 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. (2015): Liquefaction damage enhanced by interference between body wave and induced surface wave on inclined bedrock, *JGS Special Pub.* 2(19), 723-728, 2015.

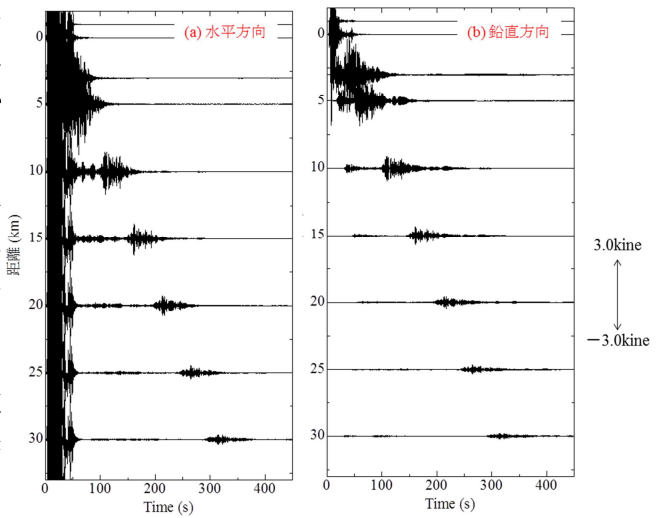


図3 地表面における速度応答

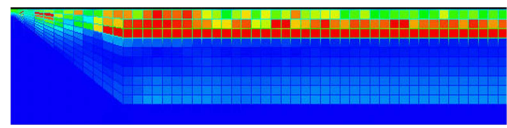


図4 地震発生から60秒後のせん断ひずみ分布

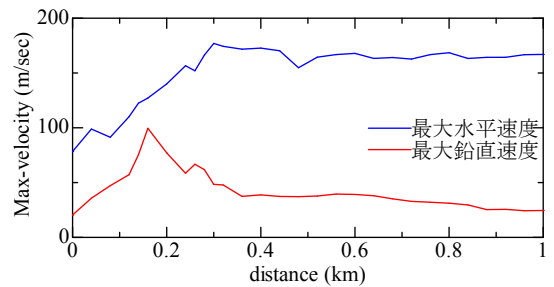


図5 傾斜部周辺の地表面最大速度応答分布

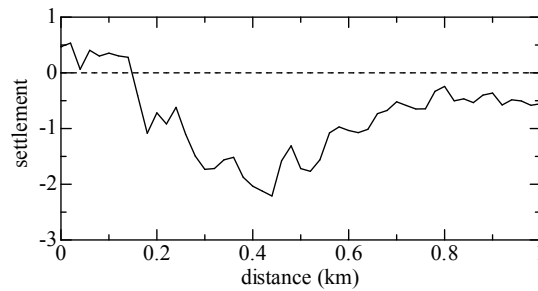


図6 傾斜部周辺の地表面沈下量分布

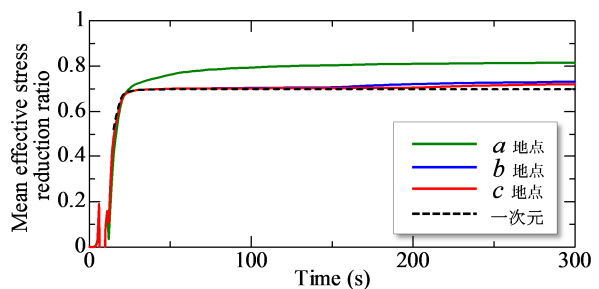


図7 異なる地点における平均有効応力低下率