

阿蘇カルデラで発生した複雑な波動伝播・増幅・干渉が引き起こす地震被害の局所化

地震応答解析 地層不整形 表面波

名古屋大学 学生会員 ○福田慎也

名古屋大学 国際会員 中井健太郎, 野田利弘, 村尾英彦

地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡顕

1. はじめに

平成 28 年熊本地震に伴い、阿蘇カルデラ内北西部に陥没性亀裂が 10km にわたって断続的に出現した。これらは、4 月 16 日午前 1 時 25 分に発生したマグニチュード 7.3 の地震後に出現し、しかも震央から直線距離で約 30km も離れた地点で局所的に発生した。熊本地震を引き起こした日奈久・布田川断層帯は阿蘇カルデラ内にまでは達していないと考えられていたこと、両断層帯は横ずれ断層帯であるのに対して、陥没性亀裂は正断層的であったことなどから、陥没性亀裂と日奈久・布田川断層帯との直接的な因果関係は認められず、これまでに亀裂が発生した原因が様々に考えられているが、未だ原因の特定には至っていない。そこで本研究では、この阿蘇カルデラの陥没被害のメカニズム解明を目的に、カルデラの不整形な盆地地形が表層地盤の地震被害に及ぼす影響を数値解析的に検討した。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¹⁾) を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**²⁾ である。

2. 解析モデル及び解析条件

阿蘇カルデラは盆地内に火山灰質粘性土が厚く堆積した不整形な地層を形成している。陥没被害の発生した石地区で実施されたボーリング調査³⁾および常時微動計測により求められた S 波速度分布⁴⁾をもとに二次元平面ひずみ状態でモデル A (図 1) およびモデル B (図 2) を作成した。S 波速度分布が得られたのは、外輪山側のみであったため、二次元モデル A は外輪山側 (図中左側) と内輪山側 (図中右側) で対称な基盤傾斜を仮定する一方、二次元モデル B では阿蘇カルデラにおいては外輪山に比して内輪山の勾配が大きいことを考慮し、非対称基盤傾斜を仮定した。また、現地から採取した不攪乱試料を用いた標準圧密試験と非排水せん断試験結果を SYS カムクレイモデルで再現することによって、阿蘇カルデラ内の土の初期状態、弾塑性パラメータ、発展則パラメータを決定している。解析に用いた入力地震動は、2016 年 4 月 16 日午前 1 時 25 分に熊本県で発生した地震の Kik-net 益城観測点における地中観測記録である。モデル底面に粘性境界を設け、簡単のため、全ての底面節点の水平方向に等しいものと仮定して地震動を入力した。

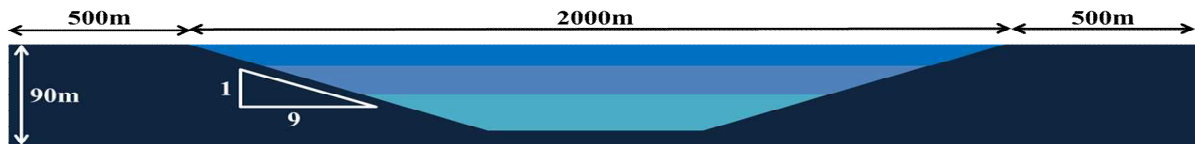


図 1 左右対称なモデル (モデル A)

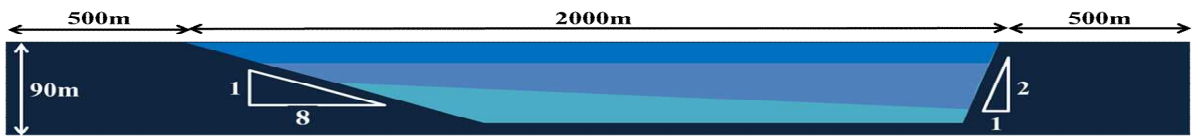


図 2 基盤の勾配が左右非対称で堆積層に傾斜があるモデル(モデル B)

3. 解析結果及び考察

1) 速度ベクトル

不整形地盤内で生じる波動伝播の様子を把握するために、モデル A の速度ベクトル分布を図 3 (地震発生から 7.25 秒後・解析領域全体) および図 4 (地震発生から 11.00 秒後・地表付近拡大) に示す。ベクトルの色は、大きさに対応しており、赤は鉛直上向き、青は鉛直下向きに大きいことを意味する。図 3 から、実体波が深部から浅部へと伝播している様子、また基盤と堆積層の境界で屈折して、水平方向の加振のみであっても鉛直動が生成している様子がわかる。また、図 4 から、盆地端部の地表面付近において円弧状の速度ベクトルが見られ、表面波 (Rayleigh 波) が生成・伝播している

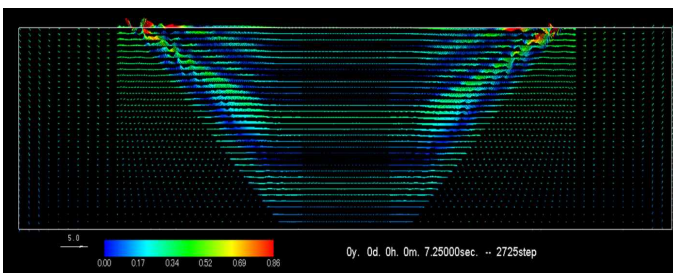


図 3 速度ベクトル (地震入力 7.25 秒後・解析領域全体)

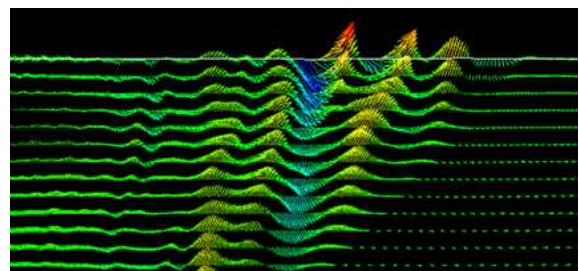


図 4 速度ベクトル (地震入力 11 秒後・地表付近)

ることが確認できる。このように、不整形な基盤形状の場合、実体波の屈折や表面波の生成・伝播など、波動伝播が非常に複雑となることがわかる。なお、図は省略するが、表面波は盆地内で反射を繰り返すので、地震終了後も滞留し続け、地表面は長時間揺れ続ける。

2) 地表面における速度応答のフーリエ振幅スペクトル

地表面で生じる揺れの様子を把握するために、モデル A の中央部と同じ地層構成の一次元モデルを作成し、二次元モデル A と比較した。地震終了から 250 秒間の盆地中央部の地表面における速度応答のフーリエ振幅スペクトルを図 5 に示す。黒線が一次元解析、赤線が二次元解析結果である。まず一次元解析結果からは、阿蘇カルデラ内には軟弱な火山灰質粘性土が厚く堆積しているため、地盤の固有周期が大きく、7.0 秒と 3.3 秒付近に卓越周期が見られる。地層不整形を考慮した二次元解析の場合は、それに加えて、長周期な表面波が生成されるため、地表面付近では、長周期の揺れがいっそう卓越することが確認された。

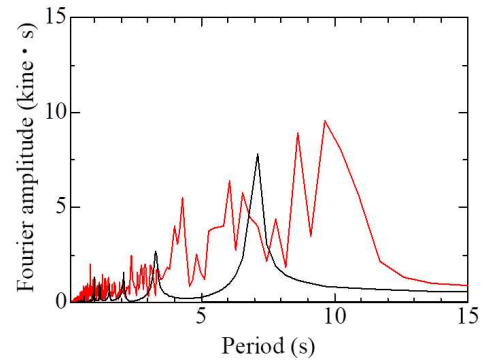


図 5 地表面速度のフーリエ振幅スペクトル

3) モデル B における平均有効応力の経時変化

モデル B の平均有効応力減少比の分布を示す。平均有効応力が減少するほど色は青から赤へ近づく。図 6 は地震終了 40 秒後、図 7 は地震終了 11 分後の様子である。図は鉛直方向に 8 倍拡大している。これらから、堆積層内の層境界、特に基盤の勾配が大きな右側（2 層目が厚い側）で平均有効応力が小さくなっていて、地震終了後も平均有効応力が減少し続けていることが確認できる。阿蘇カルデラ内には粘性土が厚く堆積するが、長周期の揺れが長時間継続することによって、粘性土であっても地盤が乱され、有効応力が減少して剛性が低下している。

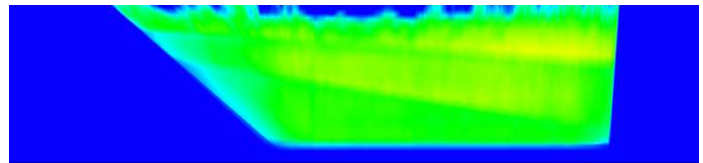


図 6 平均有効応力減少比分布（地震終了 40 秒後）

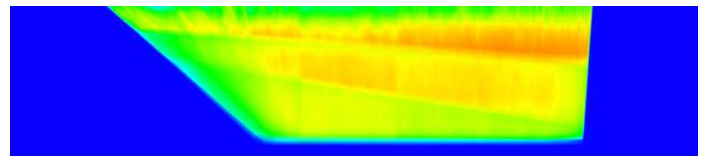


図 7 平均有効応力減少比分布（地震終了 11 分後）

4) モデル B におけるせん断ひずみの経時変化

モデル B のせん断ひずみ分布を示す。図 8 は地震終了 40 秒後、図 9 は圧密終了時の様子である。図は鉛直方向に 8 倍拡大している。図 8 からは、基盤の勾配が小さな左側の地表面付近で局所的に大きなひずみが生じており、阿蘇カルデラでの陥没被害と類似していることが確認できる。これは、深部から伝播してきた実体波と表面波が特定箇所を増幅的干渉した（エッジ効果）ためである。図 9 からは、堆積層 2 層目と 3 層目の境界でひずみが大きくなっていることが分かる。このことは、地震中に減少した有効応力の回復とともに、さらなる地盤変状が時間をかけて深部で起こりうることを示唆している。

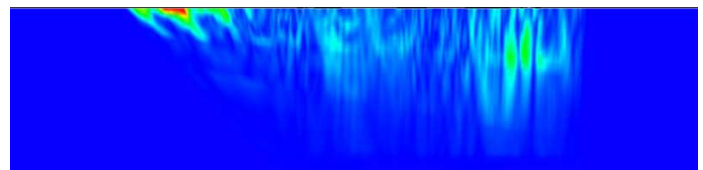


図 8 せん断ひずみ分布（地震終了 40 秒後）

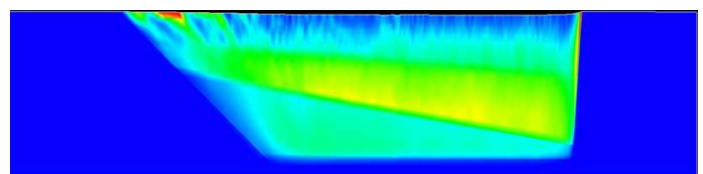


図 9 せん断ひずみ分布（圧密終了後）

4. 結論

二次元弾塑性モデルによる地震応答解析により、地層不整形性に起因する地震動の特性として、以下のことが確認された。

- ① 実体波が基盤と堆積層の境界で屈折し、それらの地震波がある点で集中する（レンズ効果）。
- ② 地表面の基盤と堆積層の境界では、表面波が生成され、実体波と表面波、あるいは表面波同士が増幅的干渉をする（エッジ効果）。
- ③ 盆地地形では、表面波が端部で反射を繰り返す、滞留し続ける。
- ④ 長周期な表面波生成に加えて、軟弱な土が堆積している場合は、土自体の固有周期が大きいため、長周期な揺れが卓越する。

阿蘇カルデラのような盆地内に軟弱粘性土が厚く堆積する地盤においては、上記の 4 つの特性が、顕著に表れることが示された。地盤不整形性に起因した長周期で長時間の揺れにより、粘性土であっても有効応力が減少し、剛性が低下することも確認できた。このことは、地層不整形性が、熊本地震（2016）による阿蘇カルデラの陥没被害のような局所的で甚大な地震被害に大きく寄与した可能性を示唆している。今後は、阿蘇カルデラの地形・地質情報を収集してより精緻なモデル化を進めるとともに（三次元解析を含む）、時間を空けずに発生した余震と本震 2 回の連続加振や入力地震動の指向性などの影響を検討していく。

参考文献 1) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, S&F, 42(5), 45-57. 2) Noda, T. et al. (2008): 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. 3) 京都大学(2016)京都大学防災研究拠点研究 29-A04 4) 土井一生ら(2017): Relationship between subsurface structure and large-scale fissures in the northwestern region in Aso valley caused by the 2016 Kumamoto earthquake, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, HCG37-P06.