地層不整形性に起因した地震被害の局所化・甚大化メカニズムの解明
～2016 年熊本地震による阿蘇カルデラの陥没被害を例に～

中井健太郎[1)]、野田利弘[2)]、福田慎也[3)]、村尾英彦[4)]、浅岡顕[5)]

1) 正会員　名古屋大学大学院工学研究科、准教授　博士（工学）
e-mail : nakai@civil.nagoya-u.ac.jp
2) 正会員　名古屋大学減災連携研究センター、教授　博士（工学）
e-mail : noda@nagoya-u.jp
3) 非会員　㈱村尾地研
e-mail : fukuda.shinya@d.mbox.nagoya-u.ac.jp
4) 非会員　名古屋大学大学院工学研究科、学生
e-mail : hidehiko.murao@muraochiken.co.jp
5) 正会員　地震予知総合研究振興会、副主席主任研究員　工学博士
e-mail : asaoka@8f.adep.or.jp

要　約

本報では、熊本地震（2016）による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。その結果、①地盤の不整形性に起因して表面波が生成、盆地内で滞留することによって長周期な地震動が長時間続くこと、②表面波が実体波と局所的に増幅的干渉を起こすこと、③長周期な揺れが長時間継続することによって、粘性土であっても有効応力が減少して剛性が低下することを確認し、不整形な地質構造が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寄与することを示唆した。

キーワード：　不整形、表面波、軟弱粘性土、地震応答解析

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. 解析モデルおよび解析条件

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的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図1に示す地盤モデルを作成した。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、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弾塑性性状（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。堆積層は3層に分割し、いずれも粘性土である。浅部および中央部は、含水比が高いシルト質粘性土であり、高間隙比かつ鋭敏な状態にある。深部は粘土分が多く、浅部・中央部に比べて含水比は小さく、間隙比も小さい。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。モデル底面の全節点にVs=700m/sに相当する粘性境界を設け、水平方向に等しく入力した。

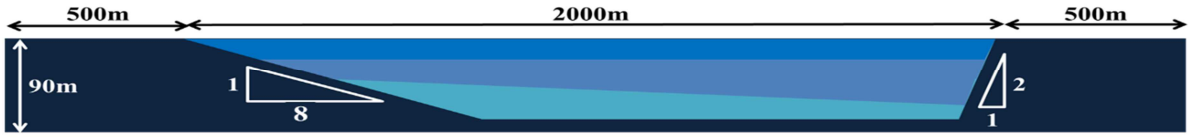

図1　地盤の概略図

3. 解析結果および考察

(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、速度ベクトル分布を図2（地震発生から7.5秒後・解析領域全体）および図3（地震発生から11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2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伝播する様子（レンズ効果）がわかる。また、図3から、盆地端部の地表面付近では、進行方向に対して逆方向に回転する円弧状の波（表面波：ここでは二次元平面ひずみ解析のためRayleigh波）が生成・伝播している。このように、不整形な地質構造の場合、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。

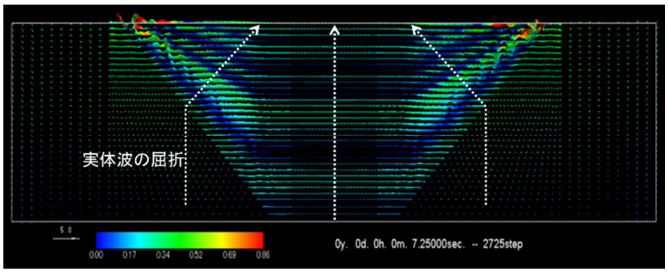

図2　速度ベクトル分布図（解析領域全体）

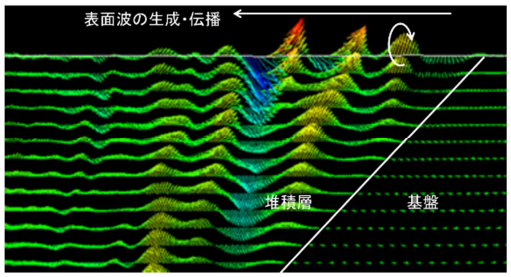

図3　速度ベクトル分布図（不整形境界付近）

(2) 速度応答のフーリエスペクトル

地表面で生じる揺れの様子を把握するために、地盤中央部と同じ地層構成の一次元モデルを作成し、二次元解析結果と比較した。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4に示す。まず一次元解析結果から、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、もともとの固有周期が長いことに加えて、地震中に地盤が乱されて剛性を失い，固

有周期がさらに長周期化し，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、長周期な表面波が生成されることに加えて，複雑な波動伝播が地盤をいっそう乱すため，長周期の揺れが一次元解析以上に卓越することが確認された。

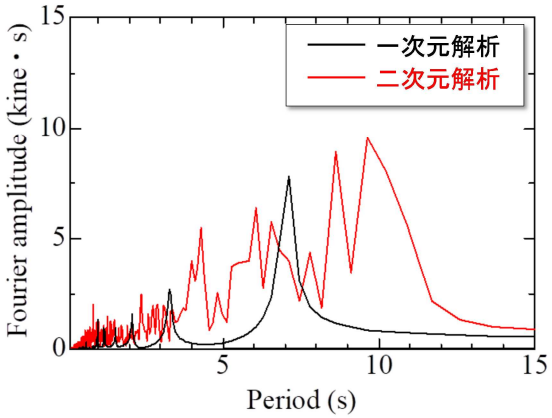

図 4　速度フーリエ振幅スペクトル

(3) 平均有効応力の継時変化

図5は地震終了直後（地震発生から40秒後）、図6は地震終了から10分後の平均有効応力減少比の分布を示す。図はわかりやすさのため、鉛直方向に8倍拡大して示している。図5のように、阿蘇カルデラ内の堆積層の平均有効応力が、粘性土であっても地震中に低下している．また、表面波がカルデラ盆地内で滞留するため、地震動終了後も平均有効応力が減少し続ける（図6）。もともと地震に対して「鈍感」と言われていた粘土地盤だが、阿蘇カルデラの粘性土は高含水比で軟弱な火山灰質土であるため、大きな揺れによって攪乱され（乱され）、平均有効応力が減少（剛性が低下）したことがわかる。

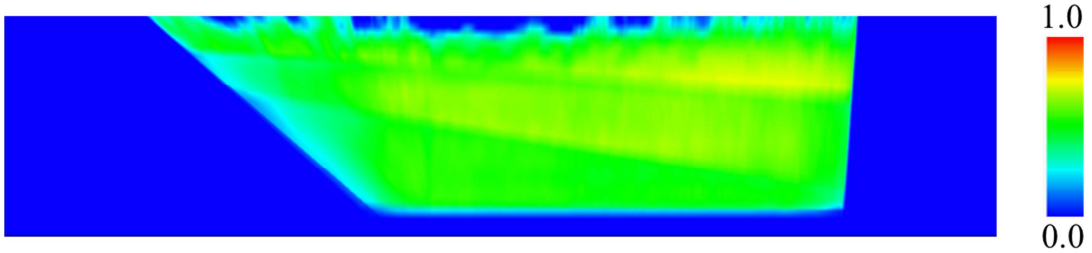

図5　平均有効応力減少比分布（地震直後）

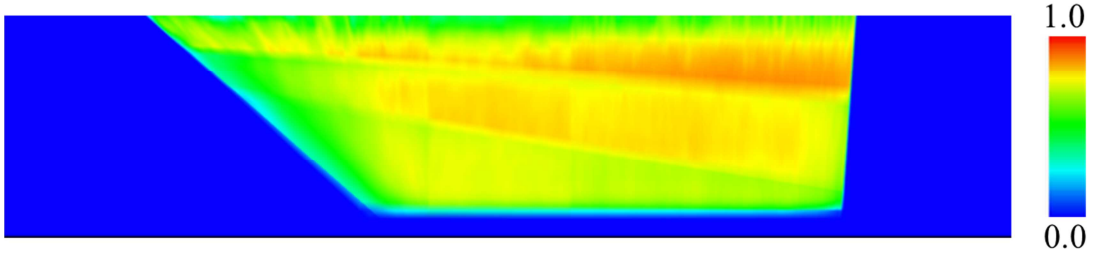

図6　平均有効応力減少比分布（地震発生から10分後）

(4) せん断ひずみの継時変化

図7は地震終了直後（地震発生から40秒後）、図8は地震発生から10年後（地震中に発生した過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下収束後）のせん断ひずみ分布を示す。図はわかりやすさのため、鉛直方向に8倍拡大して示している。図7から，地震終了直後に外輪山付近（図左側）の地表面で局所的に大きなせん断ひずみが発生しており，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で増幅的干渉した（エッジ効果）ためであり、大きな揺れによって粘性土が著しく乱されたためである。図8を見ると、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。図6を見てもわかるように、粘性土地盤であっても、堆積層が軟弱であるため、地震中に平均有効応力が大きく低下し、地震後に圧密変形を生じる。粘性土は透水係数が小さいため、今後、地盤変状が時間をかけて堆積層深部で起こりうることを解析結果は示唆している。

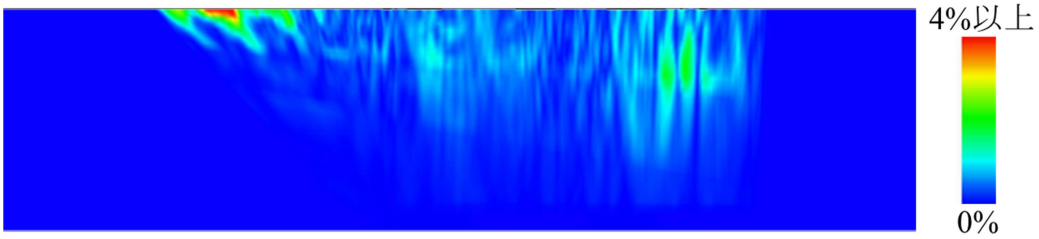

図7　せん断ひずみ分布（地震直後）

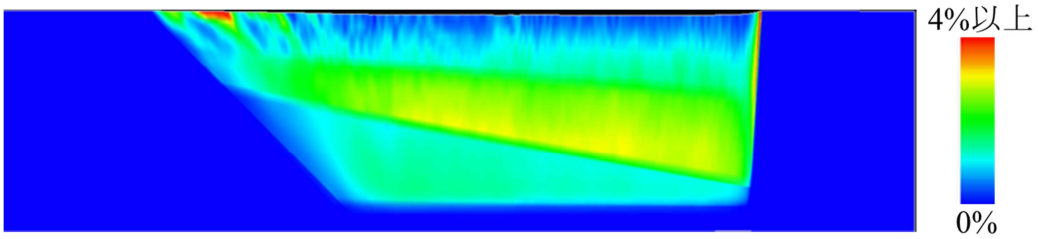

図8　せん断ひずみ（地震発生から10年後）

4. 結論

本報では、熊本地震（2016）による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二次元弾塑性モデルによる地震応答解析によって検討した。その結果、地層不整形性に起因して以下の地震動特性を確認した。

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し、滞留し続ける。
④ 阿蘇カルデラのように軟弱な粘性土が厚く堆積している場合には、もともとの固有周期が長いことに加えて、地震中に地盤が乱されて剛性を失い，固有周期がさらに長周期化する。

本解析結果は、阿蘇カルデラの地層不整形性および厚く堆積した軟弱粘性土が、熊本地震（2016）による局所的な陥没被害を引き起こした可能性を示唆している。今後は、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。

また、既往の液状化をはじめとする地震被害予測手法の多くは、鉛直一次元的な評価に留まっており、表面波生成や実体波との複雑な干渉は考慮されていない。しかし、東京・大阪・名古屋をはじめとした大都市はほとんど例外なく堆積盆地上に立地しており、その堆積盆地内にも速度コントラストの異なる沖積谷のような不整形地盤が無数に存在している。そのため、精緻な地盤被害予測のためには、大小様々な地層不整形性の影響を把握したうえで、多次元的弾塑性地震応答解析による照査が重要となってくる。

謝　辞

本論の地震応答解析に用いた入力地震波形は、防災科学技術研究所のKik-netのデータを利用させていただいた。ここに感謝の意を表する。

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, *JpGU2017*, HCG37-P06.