

# 2016年熊本地震における阿蘇カルデラ陥没被害に及ぼした地層不整形性・軟弱粘性土・連発地震の影響

Effects of Stratigraphic Irregularity, Soft Clay, and Sequential Earthquakes on the Aso Caldera Subsidence Damage in the 2016 Kumamoto Earthquake

中井健太郎<sup>1)</sup>, 野田利弘<sup>2)</sup>, 村尾英彦<sup>3)</sup>, 浅岡顕<sup>4)</sup>  
 Kentaro Nakai, Toshihiro Noda, Hidehiko Murao and Akira Asaoka

- 1) 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科 准教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: nakai@civil.nagoya-u.ac.jp)
- 2) 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科 教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: noda@civil.nagoya-u.ac.jp)
- 3) 博(工) 村尾地研 (〒939-8262 富山市塚原150, E-mail: hidehiko.murao@muraochiken.co.jp)
- 4) 工博 地震予知総合研究振興会 (〒101-0064 東京都千代田区神田猿楽町1-5-18, E-mail: asaoka@adep.jp)

Elastic-plastic seismic response analysis shows that the Aso Caldera subsidence damage in the 2016 Kumamoto earthquake was caused by the combined effects of stratigraphic irregularity of the Aso ground, the existence of soft clayey lake strata deposit, and series of large seismic events with long-period components in the later earthquakes.

**Key Words :** Stratigraphic irregularity, Soft clay, Sequential earthquakes, Seismic response analysis

## 1. はじめに

熊本地震（2016）では、阿蘇カルデラ内の北西部に約10kmにわたる帯状の陥没性亀裂が発生した。熊本地震では最大震度7を観測する地震が時間を空けずに連発したが、陥没被害は本震直後に発生しことが報告されている。安田ら[1]は、陥没性亀裂のほとんどが約9000年前に湖だった旧湖沼で出現したことを明らかにし、そこに堆積する湖成層は粘性土が支配的であること、湖成層が大きな繰返しせん断を受けると緩い砂の液状化と同様にせん断剛性が激減する性質を有することを確認している。本報では、陥没性亀裂の発生メカニズムを解明することを目的に、旧湖底が形成する「地層不整形性」、その上に堆積する「軟弱粘性土の存在」、ならびに熊本地震の特徴でもある「連発地震」に着目し、これらが表層地震被害に及ぼす影響を弾塑性地震応答解析[2]によって調べた。

## 2. 解析モデル

陥没被害の発生した地域で実施された調査・研究結果をもとに作成した、二次元弾塑性モデルの概要図を図-1に示す。解析に用いた入力地震動はKik-net益城における地中観測記録（図-2）である。最大加速度に大差はないが、フーリエ振幅スペクトルから、本震（地震②）は前震（地震①）とは異なって3秒以上の長周期成分を多く含む。

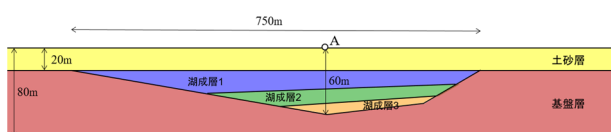


図-1 阿蘇カルデラ地盤モデル

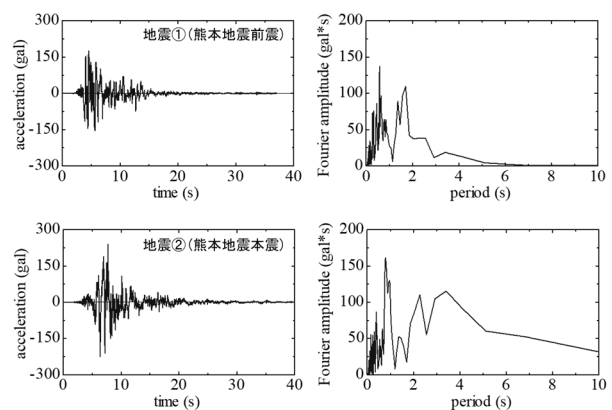


図-2 入力地震動

## 3. 陥没被害の再現解析と発生メカニズムの解明

実際と同様に28時間の時間間隔を空けて、前震と本震を入力した（表-1中のケース1）。前震および本震終了直後のせん断ひずみ分布図を図-3に示す。前震ではほとんど発生していないが、本震終了後には表層の土砂層で局所的かつ大きなせん断ひずみが発生している。図中の矢印は実際に陥没被害が発生した場所を指しているが、地震応答解析でせん断ひずみが局所化・甚大化した点と一致する。地中に目を向けると、湖成層でも局所的にせん断ひずみが大きくなっている。温泉くみ上げパイプが同じ深さで同じ向きに変形していることを根拠として、地中での大規模な水平滑動が起きたという報告もあるが、図-3からも同様の変状が発生している。前震では被害がほとんど発生せず、本震で地表面における局所的な変状および深部のせん断変形が生じている点から、本解析は阿蘇カルデラの陥没被害を再現できたと捉え、以降、局所被害が発生したメカニズムを考察する。

	前震		本震
ケース1	地震動①	→ 28時間 →	地震動② →
ケース2	×	→ →	地震動② →
ケース3	地震動①	→ 28時間 →	地震動① →

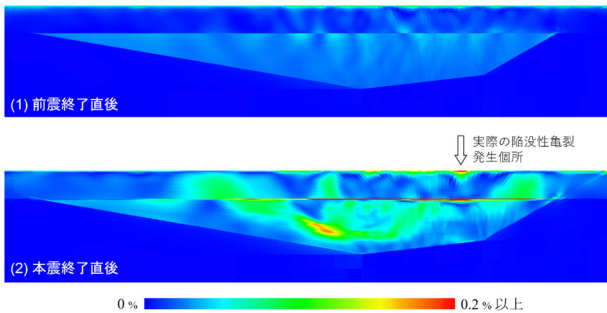


図-3 前震および本震終了後のせん断ひずみ分布

### (1) 地層不整形性の影響

湖成層左端部における本震入力時の速度ベクトルを図-4に示す。基盤基端部で反時計回りの軌跡を描く表面波（Rayleigh波）が励起され、図中左から右へ伝播している。図-5は本震終了直後の速度ベクトル図である。地表の特定箇所では鉛直動が卓越している。これは、深部から地表に向かって伝播する実体波が不整形境界で屈折・集中する焦点効果に加えて、実体波と表面波が地表付近で示す増幅的干渉（エッジ効果）によるものである。以上、地層不整形性を考慮した多次元解析を実施すると波動伝播が複雑となり、地盤内の特定箇所では揺れが局所的に大きくなる。

### (2) 軟弱粘性土の影響

図-6に前震発生から～本震終了における平均有効応力低下率の経時変化を示す。湖成層は軟弱な状態にあるため、粘性土であっても地震動によって平均有効応力が減少（剛性が低下）している。透水性の大きい表層の土砂層は、前震後に生じる圧密とともに地盤剛性が回復するが、透水性の小さい粘性土層では、前震と本震の時間間隔が短いため、地盤剛性が回復する前に本震が発生している。本震が長周期成分を多く含むことも相まって、本震終了時には湖成層の広範囲で地盤剛性が著しく低下している。図は省略するが、非軟弱粘性土の場合は地震動による剛性低下が生じにくい。

### (3) 連発地震の影響

表-1に示す地震外力シナリオのもとで、連発地震動の影響を比較した。図-7に（解析上の）本震終了直後のせん断ひずみ分布を示す（ケース1は図-3を参照）。前震を経験していないケース2や前震・本震ともに長周期成分を含まないケース3はせん断ひずみが小さく、地盤表層における被害の局所化も顕著でない。ケース1の場合は、前震で剛性が低下して固有周期が増大した地盤に対し、長周期成分を多く含む地震動が連続発生したため、共振によって湖成層における長周期成分が著しく増幅され、地表の大きな揺れを発生させたため、甚大な地盤被害に繋がった。

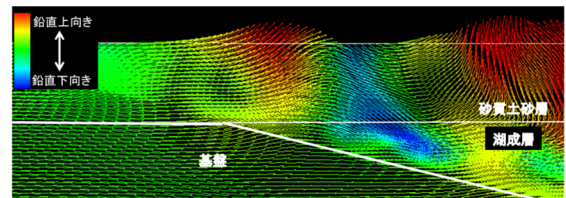


図-4 本震入力時の速度ベクトル図

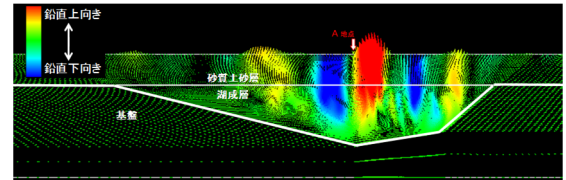


図-5 本震終了直後の速度ベクトル図

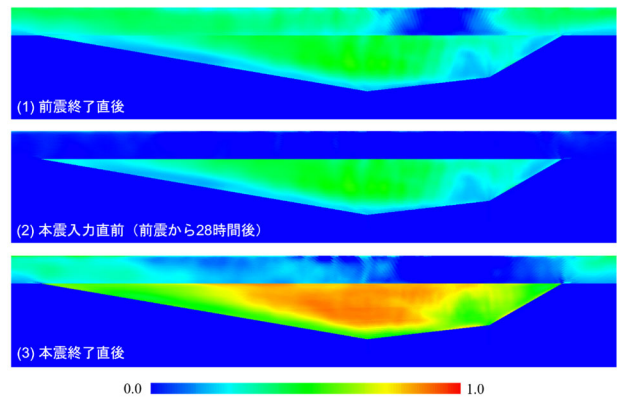


図-6 平均有効応力低下率の経時変化

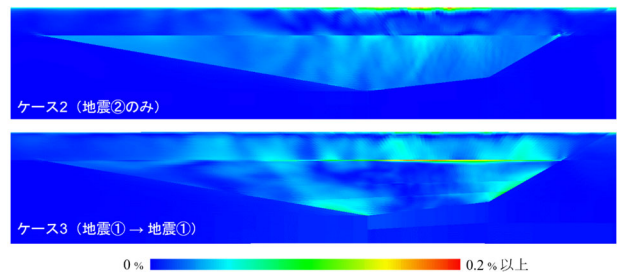


図-7 異なる外力シナリオ下におけるせん断ひずみ分布

## 4. おわりに

阿蘇カルデラ陥没被害の発生は、地層不整形性とそこに堆積する軟弱な湖成層の存在に加えて、強い揺れが時間を空けずに発生し、後発の本震が長周期成分を多く含んでいたことも極めて重要であり、これら全てが複合的に作用することで発生したことを弾塑性地震応答解析で示した。このことは換言すれば、これら3要因のうち一つでも欠けていれば、阿蘇カルデラの陥没性亀裂被害は発生しなかった可能性があることを示唆している。

### 参考文献

- [1] 安田進ら, 2016年熊本地震により阿蘇カルデラで発生した..., 日本地震工学会論文集, 21(1), 135-158, 2021.
- [2] Noda, T. et al., Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate..., S&F, 48(6), 771-790, 2008.