

熊本地震による阿蘇カルデラ内で発生した陥没 周辺の地盤構造評価

大保 直人¹・先名 重樹²・安田 進³・石川 敬祐⁴・野村 勇斗⁵

¹正会員 (公財)地震予知総合研究振興会 (〒160-0004 東京都千代田区猿楽町 1-5-18)

E-mail: ohbo@8f.adepr.or.jp

²正会員 (国研)防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

E-mail: senna@bosai.go.jp

³正会員 東京電機大学 副学長 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

⁴正会員 東京電機大学助教 理工学部 建築・都市環境学系 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: ishikawa@g.dendai.ac.jp

⁵学生会員 東京電機大学 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: 14rg063@ms.dendai.ac.jp

2016年熊本地震により阿蘇のカルデラ内では地盤が帯状に陥没するグラーベン現象が発生し、その上に位置した家屋、ライフラインなどが甚大な被害を受けた。このような被害は国内では近年発生したことがない。この現象は、正断層かカルデラに起因した陥没の可能性があり、国内外の将来の地震に備えてメカニズムの解明が必要である。本文では、陥没が発生した小里、内牧および狩尾地区の被災メカニズム解明や対策方法を明らかにするためには地盤構造を知る必要が有る。ここでは、陥没に沿った地点を対象に常時微動観測を実施し、地盤のS波速度構造の評価を行った。この陥没地域には、表層付近に固い層の存在、20m付近に低速度層の存在、および基盤層が深くなる地域の存在が明らかにできた。

Key Words: *kumamoto earthquake, aso area, microtremo, S-wave velocity structure*

1. はじめに

2016年熊本地震により阿蘇のカルデラ内では地盤が帯状に陥没するグラーベン現象が発生し、その上に位置した家屋、ライフラインなどが甚大な被害を受けた。これは、正断層あるいはカルデラに起因した陥没の可能性があり、被災した地区では今後の本復旧にあたって、メカニズムの解明が急務である。

陥没が発生している地域は、カルデラの縁から内側に基盤が急に落ち込んでいる地区のため、表層の軟弱層の厚さが急増する箇所であり、地震動で体積圧縮した量が部分的に異なり段差が発生した可能性が有る。或いは、カルデラの陥没に伴い表層内にも正断層型のずれが生じかけていたところに地震が襲い、表層までずれが及んで段差が発生した可能性、また、ある範囲内が滑ったり、せん断変形して水平変位が生じたためにその縁あたりで水平土圧が減少して落ち込んだことも考えられる。

そこで、陥没発生メカニズム並びに地盤構造を調べ

るために、以下のような調査、試験、および地震応答解析の実施を計画した。

1) 衛星からの画像解析や現地聞き込み調査、航空写真測量などによって地表の変動状況を把握する。

2) 住民の方々からのヒアリングやライフラインの被害収集などを行って、被害状況を把握する。

3) 既往のボーリングデータの収集を行い、さらに地震探査や表面波探査・トレンチ掘削による水平方向の調査と、ボーリングや孔内試験による鉛直方向の調査を行い、3次的に陥没状況を把握する。

4) 現地から不攪乱試料を採取し、引張り強度や繰返し載荷後の単調せん断試験などの特殊な土質試験を行い、それらの特性を求める。

5) グラーベンを横断する断面に対し2次元地震解析を行って揺れおよび水平方向の引張りひずみ分布を求める。また、残留変形解析や安定解析などを行う。これらの結果と1)~4)を総合してメカニズムを解明する。

ここでは、陥没発生地域を対象にし、これに沿った測

線並びに直交する測線の地盤構造評価ボーリング調査では得られない深部までのS波地盤構造を推定するため、常時微動観測を行った。

常時微動観測は、陥没が発生した3地区（小里，内牧，狩尾）の陥没地点およびその周辺で9地点で実施した。計測は、地表に3方向（水平2方向と上下方向）の微動計を6ヶ所に設置し、約15分程度の微動アレイ観測を実施した。

2. 熊本地震における阿蘇市の被害概要^{1), 2)}

2016年4月に起きた熊本地震により阿蘇市カルデラ内では広範囲にわたって帯状の陥没が発生した。この影響により、建物や道路の被害はもちろんのこと、水田では亀裂により水が行き渡らず作物が出来ない被害、さらにライフラインに多大な被害を受けた。

住宅に被害が多く発生した小里，内牧，狩尾地区の住民に対してインタビュー方式でまずヒアリングを実施した¹⁾。このヒアリングは、地震から1年1か月経った後、狩尾地区では現地人の案内を受けながら5名の方から被災状況をまとめた。

図-1は、狩尾地区のヒアリング結果を参考に作成した陥没や地割れが発生した概略の位置を示す。図中実線で示したのは国土地理院で調べられた亀裂、この地区では住民の方も詳細に亀裂や陥没の分布を示してある。

これによると国土地理院の分布に加えて図中③の地区でも亀裂や陥没が発生した。また、⑤の田んぼの中には温かい水が噴き出したとのことで、1年経っても噴き出しが続いていた。この陥没現象が起きた箇所は盆地内で、狩尾を中心に東は役犬原から西は的石まで半径5km範囲で広範囲に帯状の陥没が発生していた。そのほとんどが帯状に亀裂が入り、地盤が1m前後落ち、両側に垂直な壁ができていた。

図-2は狩尾地区のヒアリングを行った①近傍の建屋の玄関前の陥没被害写真を示す。庭が約1mの陥没が発生したが、振動による被害はほとんどなかったとのことであった。

3. 微動観測

陥没した周囲の地盤構造を調べるために、狩尾をはじめとし、内牧，小里地区，役犬原地区で常時微動観測を実施した。計測は、9か所で実施した。A1地点は、小里地区で陥没した農地に水が溜まった横を通る道路、A2地点は、狩尾地区で被災を受け、その状況をヒアリングを受けた住民の敷地内、A3地点は、狩尾地区で図-



図-1 国土地理院で調べられた狩尾地区の亀裂分布に住民の方が調べられた亀裂を加筆した図¹⁾



図-2 狩尾(A3地点)付近の陥没被害状況



図-3 狩尾地区の観測地点



図-4 狩尾 A3 地点での微動観測状況

2 の陥没した手前の建物で陥没により家屋が被災し、家屋が撤去された敷地内、A4 と A5 地点は陥没した A3 地点の延長上の畑・農道、A6 と A7 地点は内牧地区の陥没が発生した周辺、A8 地点は、内牧温泉から湯浦に向かう道路で地盤改良が進められている周辺、A9 地点は陥没が発生した役犬原地区の農道で実施した。

図-3 は狩尾地区で陥没に沿った地点で実施した A2~A4 の微動観測地点を示す。

図-4 は狩尾地区の A3 地点での常時微動観測状況を示す。微動計は、観測地点の中心に 1 台とその半径 0.6m の円周上に 3 台（正規アレイ）の合計 4 台とその中心と辺長 7~13m の三角形となる 2 台配置し（不規則アレイ）、計 6 台で観測を行った。利用した微動計は、一体型常時微動観測機材(JU410)を用いて、各地点 15 分間のデータを収録し、数 m から数十mの深さの S 波速度構造を推定する。なお、サンプリング周波数は 200Hz とした。

4. 観測結果

(1) S 波速度構造の解析手法^{3)~6)}

S 波速度構造は、(国研) 防災科学技術研究所で提案・高度化されているアレイ微動観測に基づく浅部地盤探査手法を用いて評価した。

解析は、微動解析ソフト「BIDO2」および「Microtremor Array Tools」等を用いて、以下の手順で行った。

- 分散曲線および H/V スペクトル比の自動解析、読み取り
- AVS30 等の増幅特性の抽出
- 分散曲線の直接深度変換 (Simple Profiling Method ; SPM)
- 簡易逆解析 (Simple Inversion Method ; SIM) 等の逆解析処理
- H/V と c), d)の工程で得られた速度構造を初期値としたジョイントインバージョン (線形化逆解析)
- Vs350 および Vs500 上面深度の抽出

ここでは、a)~d)の処理を実施し S 波速度構造を求めた。

(2) 得られた地盤構造

図-5 は、A2, A3, A4, および A5 地点で得られた分散曲線を示す。0~5Hz 付近の位相速度の変化は、全ての観測地点で同じ傾向である。5~12Hz 付近は、A2~A4 は同じ位相速度を示している。しかし、10Hz 以上では、A2 と A3 は同じ位相速度の変化を示しているが、A4 は小さな位相速度となっている。一方、A5 地点では陥没が発生しているが、A3, A4 の陥没の延長上から離

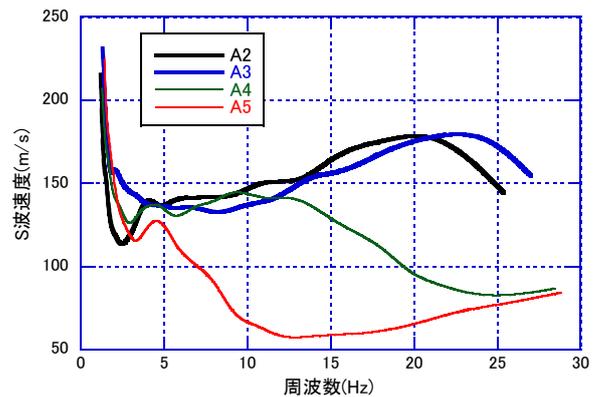


図-5 観測地点の分散曲線

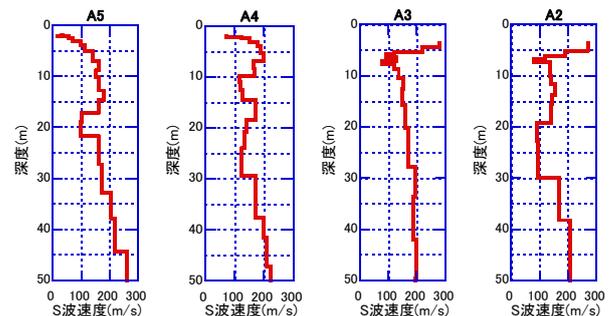


図-6 A2,A3,A4,および A5 地点 S 波速度構造

表-1 地盤構造の概要

	観測地点								
	小里		狩尾			湯浦	内牧		役犬原
平均深さ (m)	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9
表層	8.4	8.8	2.6	7.0	3.6	12.0	2.7	2.4	3.1
基盤	45.0	56.0	56.0	43.0	45.0		17.0	6.5	35.0
F	○	○	○				○		
L		○		○	○			○	
D						○	○	○	○

観測から確認できたこと
 F ・表層に固い層有
 L ・一部低速度層有
 D ・基盤層が深い

れており、陥没の傾向が異なっている可能性が有る。この影響が、5Hz~25Hz の位相速度の違いに表れている可能性が有る。この図から、A2 と A3 地点は、同じような地盤構造特性を持っている事、A4 と A5 は、A3 と A4 とは、地盤構造に違いがある結果を示している。

図-6は、A2, A3, A4, および A5 地点の深さ方向の S 波速度分布を示す。なお、この結果は図 3 の並びとなっている。A2 と A3 地点は、深さ 5m 付近に S 波速度約 300m/s の固い層が存在する。これは、狩尾地区の住民からのヒアリングで、固い地盤が存在することを裏付ける興味ある結果が得られた。

一方、A4 と A5 地点には、表層付近に S 波速度 300m/s の層は無く、A3 と A4 の表層構造は連続的でない結果が得られた。今後、処理 e) と f) の実施、既存の地質柱状図等との比較・検討を実施する予定である。

表-1は、今回の微動観測で得られた9地点の表層厚さ、基盤深さ並びに表層に固い層の有無、低速度層の有無、基盤深さに関する定性的な傾向を示した。小里、狩尾、内牧地区の一部で表層に固い層の存在が、狩尾と内牧地区に低速度層が存在する事、および内牧と役犬原地区の基盤層が小里、狩尾地区より深い傾向にある。これらの結果を確認するため、陥没に沿った測線並びに深い層の存在を確認するための大規模アレイ観測を含め、追加の微動観測を実施し、より詳細な地盤構造の評価を計画している。

5. まとめと今後の課題

ここでは、陥没被害が発生した地域での地盤構造の評価を目的として常時微動観測を実施し、S波地盤構造の評価を行った。

陥没被害が発生したこの地域には、表層付近に固い層が存在し、地域住民のヒアリングで「とが（或いは：とげ）」と呼ばれている層の存在が確認できた。また、今回の微動観測から、役犬原地域（A9地点）でも固い層が存在することも住民の話から得ることができた。

この地域で、追加の微動観測を実施し、現在分析を進めている。さらに、本検討を被害地域の地盤ボーリング資料の収集、表面波探査を実施しており、今後より詳細な地盤構造を明らかにする予定である。

6. あとがき

本研究は JSPS 科研費基盤研究(B)17H03306 を用いて実施したものである。微動観測実施にあたっては阿蘇市役所および住民の方々、微動観測機器の借用・分析にあたっては、(国研)防災科学技術研究所 神・若井研究員はじめ協力を頂いた皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安田進, 村上哲, 永瀬英生: 2016年熊本地震による阿蘇カルデラ内の陥没被害に関するヒアリング, 日本第四紀学会 2017年大会, 福岡.
- 2) 国土地理院, 平成 28年熊本地震・空から見た(航空写真判読による)布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html> (参照 2017-6)
- 3) 若井淳, 先名重樹, 神薫, 長郁夫, 松山尚典, 藤原弘行, 関東地域における極小アレイ微動観測に基づく浅部地盤の高度化, 第 52 回地盤工学研究発表会, 論文番号 880, 2017年
- 4) 長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三: 極小アレイによる新しい微動探査法, 浅部地盤平均 S 波速度の簡便推定, 物理探査, 61(6), 457-468, 2008.
- 5) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78, KS13-KS23, doi:10.1190/geo2012-0248.1, 2013.
- 6) 長郁夫, 先名重樹: 極小微動アレイによる浅部構造探査システムー大量データの蓄積と利活用に向けてー, *Synthesiology*, Vol.9 No.2, pp.86-96, 2016.

(2017.9.1 受付)

THE SOIL STRUCTURE AROUND GURABEN WHICH OCCURRED AROUND IN THE ASO CALDERA CAUSED BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Naoto OHBO, Shigeki SENNA, Susumu YASUDA, Keisuke Ishikawa and Yuuto NOMURA

The GURABEN phenomenon by which foundation collapses in beltlike occurred in the Aso caldera caused by the 2016 Kumamoto Earthquake, and these houses in an area and lifeline suffered enormous damage. There are no examples which occurred in recent years in the country for such damage. There is a possibility of the collapse caused by a normal fault or a caldera, and this phenomenon prepares for a domestic and abroad future earthquake and needs explication of a mechanism.

A micro tremor observation were conducted at the site of the Osato, Uchinomaki and Kario site to estimate the S-wave velocity structure of ground. It is found at a solid layer exists around the surface, a soft layer exists in about 20 m of depth, and it became clear that the area where solid foundation is deep exists.