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連発地震の影響

名古屋大学　(正)○中井健太郎，(学)福田慎也，(フェロー)野田利弘
地震予知総合研究振興会　(フェロー)浅岡顕
㈱村尾地研　(正)村尾英彦

1. はじめに

熊本地震では，阿蘇カルデラの北西部に約 10km にわたる帯状の陥没性亀裂が発生した．最大震度 7 を観測する地震(前震と本震)が時間を空けずに 2 回発生したが，陥没被害は本震直後に発生し，同程度の揺れであった前震の際には発生していない．陥没性亀裂の発生原因として，地下空洞の圧壊，地表地震断層，地盤深部における地質学的ブロックの水平滑動，断層運動など様々に考えられてきたが，その明確な痕跡は見つかってはおらず，未だ原因の特定には至っていない．中井ら [1)]は，阿蘇カルデラ内の旧湖底が形成する「地層不整形性」およびその上に堆積する「軟弱粘性土の存在」に着目した二次元弾塑性地震応答解析を実施し，(1)厚く堆積した軟弱な湖成粘性土層で地震動の長周期成分が増幅したこと，(2)地層不整形性に起因する複雑な波動伝播(実体波の焦点効果，長周期な表面波の励起，実体波と表面波が特定場所で起こすエッジ効果)によって地盤内の特定箇所で揺れが大きくなったことを示し，これらが阿蘇カルデラ内の陥没性亀裂被害を引き起こした要因であることを示した．本報では，上記(1)(2)に加えて，(3)熊本地震の特異性，つまり震度 7 の強い揺れが時間を空けずに発生し，さらに後発の本震が長周期成分を多く含んでいたことも陥没性亀裂発生の重要な要因の 1 つであることを弾塑性地震応答解析 [2)]によって示す．

2. 解析モデル

石川ら [3)]の調査結果を参考に，図 1 に示す地盤モデルを作成した．解析全領域は幅 2,400m であるが，その中央部を鉛直方向に 2 倍に拡大して示している．カルデラ湖の湖底を基盤とする盆地形状の地層不整形性を表現しており，中井ら [1)]と同じモデルである．硬質な基盤内に湖成粘性土層が堆積しており，湖成層はその状態の違いから 3 層に分割されている．また，表層付近には厚さ約 20m の土砂層が堆積する．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．以降，熊本地震の前震を地震動①，本震を地震動②と呼ぶが，地震動①に比べて地震動②は長期成分を多く含む．熊本地震は 28 時間程度と短い時間間隔で震度 7 の地震動が連発した点が特徴である．連発地震動の影響を把握するために，表 1 に示す 3 ケースで地震

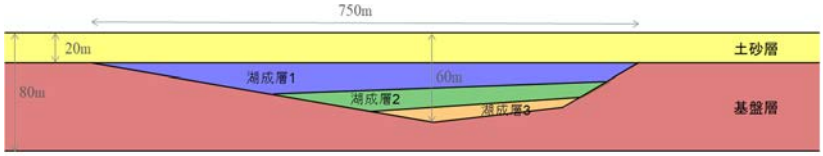

図 1　地層不整形性を有する阿蘇カルデラの地盤モデル

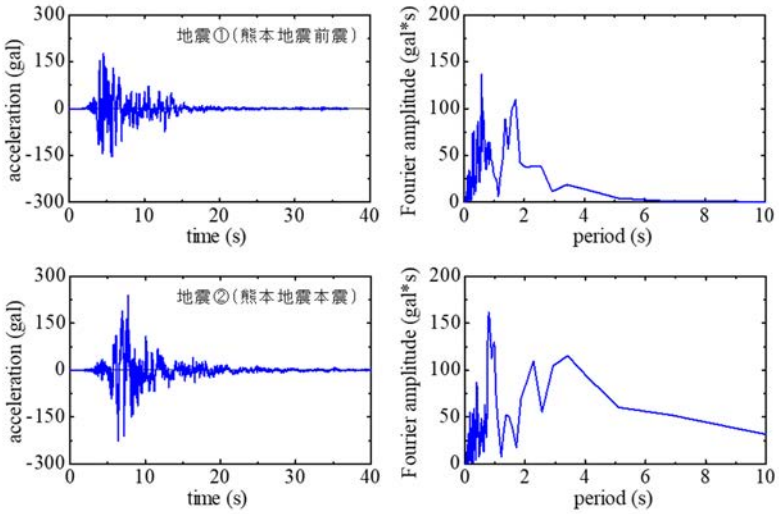

図 2　入力地震動

表 1　計算条件(地震動シナリオ)

	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	→→

連発地震，長期地震動，地震応答解析

〒464-8603　名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻　TEL: 052-789-5203, FAX: 052-789-3836

© Japan Society of Civil Engineers

応答解析を実施した(ケース 1 は実被害の再現解析[1)]に相当).

3. 解析結果

図 3 に(解析上の)本震終了直後のせん断ひずみ分布のケース比較を示す．ケース 1 は，実被害と同様に，表層におけるせん断ひずみの局所化と土砂層と湖成層境界におけるせん断変形が見られる．一方，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地震動①であるケース 3 は，ケース 1 と比べて地盤内の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．図 4 はケース 1 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．また，前震と本震の間隔が短いため，前震中に湖成層で蓄積した過剰間隙水圧が消散しないうちに本震が発生した様子がわかる．つまり，ケース 2 は余震の影響を考慮していないため，地震動②による湖成層における平均有効応力減少を過小評価していたことがわかる．続いて図 5 は，ケース 3 における本震終了直後の平均有効応力低下率を示す．ケース 1 と前震履歴は等しいが，ケース 1 の方が本震中の平均有効応力減少の程度が大きい．ケース 1 の場合は，前震で平均有効応力が減少／剛性が低下して固有周期が増大した地盤に対して，長周期成分を多く含む地震動②が連続発生したことによって，長周期成分が著しく増幅されたためである．この湖成層における長周期成分の増幅が地表の大きな揺れ・被害を発生させたと考えられる．

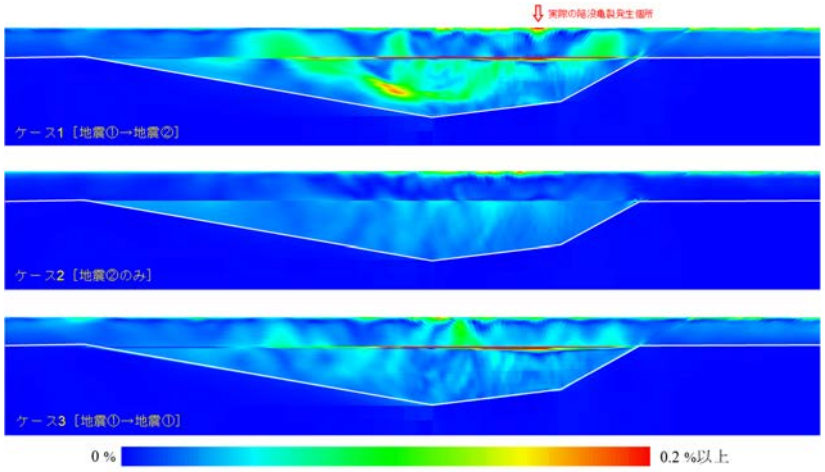

図 3　本震直後のせん断ひずみ分布の比較

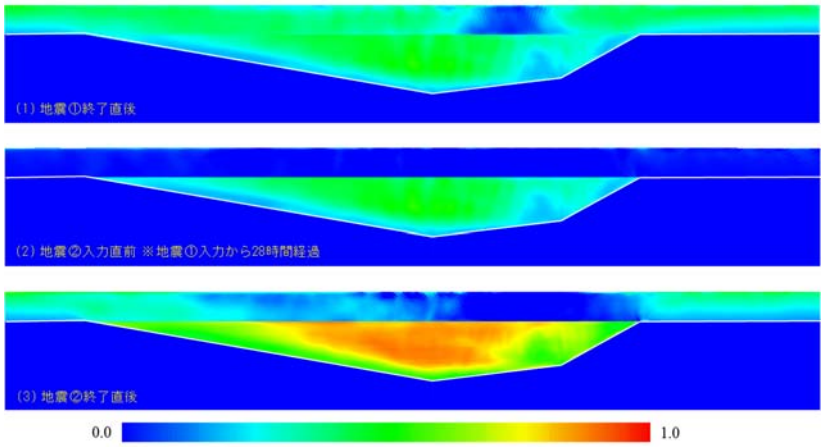

図 4　平均有効応力低下率の経時変化(ケース 1)

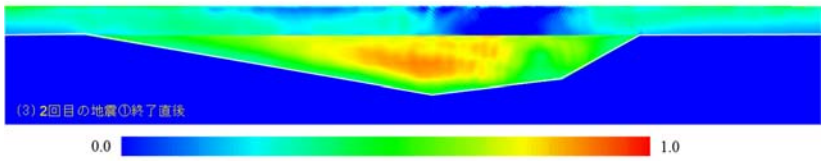

図 5　本震直後の平均有効応力低下率(ケース 3)

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，震度 7 を観測した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) 中井ら, 2016 年熊本地震における阿蘇カルデラ陥没被害に及ぼす地層不整形性と…, 第 56 回地盤工学研究発表会, 投稿中.　2) Noda, T. et al., Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion…, S& F, 48(6), 771-790, 2008.　3) 石川ら, 2016 年熊本地震による阿蘇カルデラ内の湖成堆積物の軟化現象を考慮した残留変形解析, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.

© Japan Society of Civil Engineers