

熊本地震が提起した活断層評価および地震防災の課題

Significant issues posed by the 2016 Kumamoto earthquake with regard to active fault assessment and disaster mitigation

*鈴木 康弘¹

*Yasuhiro Suzuki¹

1. 名古屋大学

1. Nagoya University

1995年阪神・淡路大震災以降、活断層地震は地震防災上の重要なターゲットとされた。大地震を起こす可能性のある主要活断層が選定され、それらについて地震発生長期評価が進めてきた。熊本地震を起こした布田川一日奈久断層は主要断層の一つであるため、熊本地震およびその災害は詳細に検証される必要がある。地震発生を十分予測できていたか、これまで地震本部が提供した情報は被害軽減に役立ったか、今後の活断層地震防災のために地震本部および研究機関はこの地震から学び、何をすべきか。

熊本地震の被災者の多くが布田川一日奈久断層の存在を知っていた。地震発生可能性が「やや高い」レベルにあることも伝えられていた。このことは22年間の大きな成果である。しかしながら、地震対策が実際に進められていたかどうかについては大きな疑問がある。従来の情報が地震防災対策の実施に対してどの程度効果的であったかどうかは批判的に検証される必要がある。熊本地震の際の断層の挙動は、活断層評価において想定された断層区分と一致していない。またトレンチ調査結果からは、むしろ地震発生確率が低いと推定される区間が地震を起こしている可能性がある。そのため従来の活断層評価の妥当性を検証する必要がある。

活断層に沿って「震災の帯（被害集中域）」ができたことも熊本地震の顕著な特徴の一つである。現行の規定では、気象庁は地震計設置地点以外では震度7を認定することができないため、公式には益城町と西原村にのみ震度7が認定されているが、実際には南阿蘇をはじめとする地震断層沿いではいずれも震度7相当であった可能性が高い。建築基準法は改定しないという方針が国交省から出されているが、震度7に対して現行の基準が十分でない可能性は極めて高い。そのため将来の地震防災にとって、震度7になり得る地域を特定し、耐震化に関する指導を行う必要がある。また、従来の強震動計算においては、深さ3km以浅は強震動を生成しないとされてきたが、今回の観測結果はこの前提に疑問を呈している。強震動生成および被害発生との関係について解明されるべき課題は多い。

さらに、熊本地震においては様々な地変が現れた。その中には、①震源断層の地表出現と判断される狭義の地震断層のほか、②震源断層とは連続せず付随的に変位した断層、③震源断層とは無関係の重力性の地すべりなどがある。現状においてそれらが明確に区別できているだろうか？ 地変のメカニズムを明確にすることは重要であり、今後の地震防災において①のみの予測にとどまらず、地表変位のハザード評価を充実される必要がある。

1995年阪神淡路大震災においても解明できなかった課題は多かった。その原因のひとつは分野間連携の調査体制が整わなかったことにあるため。熊本地震後の調査においてはその反省を十分踏まえ、新たな研究推進体制を地震本部が主導して構築することが急務である。

キーワード：熊本地震、活断層評価、地震防災

Keywords: Kumamoto earthquake, active faults assessment, disaster mitigation

2016年熊本地震による都市域の斜面災害

Landslides in urban residential region induced by the 2016 Kumamoto earthquake

*釜井 俊孝¹、土井 一生¹、王 功輝¹

*Toshitaka Kamai¹, Issei Doi¹, Gonghui Wang¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Recent destructive earthquakes in urban regions, such as the 1978 Miyagiken-oki earthquake the 1995 Kobe earthquake, and the 2011 Tohoku earthquake have destabilized many of the gentle slopes in residential areas around large cities in Japan. Beyond the serious danger to residents of the earthquake affected areas, these landslides revealed the weaknesses of urban development in cities of Japan. The 2016 Kumamoto earthquake induced serious damages in the suburbs of Kumamoto city. The strong motion along the earthquake fault across the urban region caused slope damages, that are building deconstruction, collapse of houses, and landslides of artificial steep slopes, but also the ground condition controlled their distribution and landslide mechanism.

キーワード：盛土、宅地開発

Keywords: Fill, Residential developments

2016年熊本地震における地表地震断層の直上の建物被害と対策

Building Damage on Surface Faulting of 2016 Kumamoto Earthquake, and Counter Measures

*久田 嘉章¹

*Yoshiaki Hisada¹

1. 工学院大学建築学部

1. Kogakuin University, School of Architecture

前報（文献1）に続き、地表地震断層近傍の建物被害調査を報告し、活断層に有効な対策を考察したい。調査は外観目視により、築年・用途・構造・階数・基礎形式・屋根形式・地盤変状の有無、破壊パターン（D0～D6：岡田・高井（1999）に準拠）等を対象に、計240棟（倉庫を除くと193棟）で行った。

調査例として図1と表1に御船町高木地区の建物の被害分布と統計結果、写真1に建物の被害例を示す。この地区の調査建物数は39棟で、9割は低層木造住宅（2階以下）であった。築年と全壊率（D4以上）の関係では、新しい建物で0%、古い建物で17%、非常に古い建物で29%であった。図1には都市圏活断層図（国土地理院）による活断層と、出現した地表地震断層の位置を示すが、両者は比較的近いが、建物スケールでは一致しない。一方、表1には地表地震断層の直上とそれ以外の被害統計を示すが、前者の全壊率は43%に対して、後者では13%であり、断層直上で被害が集中している。写真1は断層直上の典型的な被害例である。(a)は古い在来木造住宅で、基礎の無筋コンクリートブロックが断層すべりで破壊され、建物が大きく変形・大破している。次に(b)は断層直上の新しい住宅（恐らく軽量鉄骨造）であり、敷地の盛土で断層すべりが緩和されていた。さらにRC造のべた基礎が非常に有効であり、基礎に若干の亀裂があったが、断層すべり変位の影響を遮断し、建物は無被害であった。最後に(c)は非常に古い伝統木造建築であり、独立（束）基礎であるため、断層すべりが建物を変形・大破させているが、建物は変形に柔軟に追随し、倒壊は免れていた。

他の調査地域でも同様な結果で、50cm程度までの断層変位であれば、新しい建物のRC補強のべた基礎などの効果でほぼ無被害であり、古い木造建物でも変形に追随できる場合、倒壊は免れていた。一方、強震動については、地盤の良否などでその強さと被害には大きな地域差がみられた。例えば、益城町下陣地区（調査建物数61）では、強震動により大破した建物は皆無であり、震度は5強程度と推定された。大破は地表地震断層直上の1棟のみで、50cm程度の縦ずれ変位に起因していた。一方、南阿蘇の黒川・河陽地区（調査建物数54）では、断層直上とそれ以外の全壊率は64%（倒壊率は18%）と53%（倒壊率は42%）であった。その殆どは耐震性に劣る古い木造建物に集中したが、震度7に相当する非常に強い揺れが生じたと推定された。

最後に、活断層に対する建物対策を考察する（詳細は文献2,3）などを参照）。災害時に機能継続を要する重要建物は活断層帯を避けることが望ましいが、一般の建築では以下のような対策を行うことで倒壊するような大被害の可能性を大きく低減できる。

- ・盛土などによる断層すべり変位を分散する対策
- ・新築の小規模建築では、地域係数を1、耐震等級を2以上とし、RCべた基礎、高い剛性の躯体、軽い屋根等による強震動と地盤変状への対策
- ・新築の大規模建築では、地盤調査で断層位置とすべり量を特定し、断層を避ける、エクspansionジョイントなどでの構造的な分離などの地盤変状への対策
- ・既存建物では、耐震診断・補強による倒壊防止対策
- ・免震建物では、震源近傍強震動を考慮したレベル3地震動による余裕度検証や、断層すべりや地盤傾斜への対応策（フェールセーフなどの機能の追加など）の実施

上記の被害低減対策に加え、負傷者を出さない・避難しない対策、災害時対応力を併せたレジリエントな対策が有効である。

- ・室内や設備機器等の安全対策
- ・自助と共助による災害発生時の対応力向上策（研修・訓練・改善など）

謝辞：本調査には村上正浩・金田惇平・寺本彩乃・柳田悠太郎・進藤俊弥氏（工学院大）、鱒沢曜氏（鱒沢工学研究所）、境茂樹・森清隆・仲野健一・東條有希子氏（安藤ハザマ）、木本幸一郎氏（SAI構造設計）、小林亘氏（東京電機大）、鈴木光氏（減災アトリエ）が参加し、田中信也氏（東電設計）に情報提供を頂きました。また文部科学省科研費（JP16K06586）の助成を受けています。

参考文献：1) 久田 ほか、2016年熊本地震の地表地震断層の近傍における建物被害調査（その1）、（その2）、日本地震学会秋季大会、2016。

2) 久田、活断層と建築の減災対策、活断層研究、28号、pp.77-87, 2008.

3) Bray, J.D, Designing Buildings to Accommodate Earthquake Surface Fault Rupture, ATC & SEI 2009 Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, 2009.

キーワード：2016年熊本地震、地表地震断層、建物被害と対策

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, Surface Faulting, Damage and Counter Measures of Building

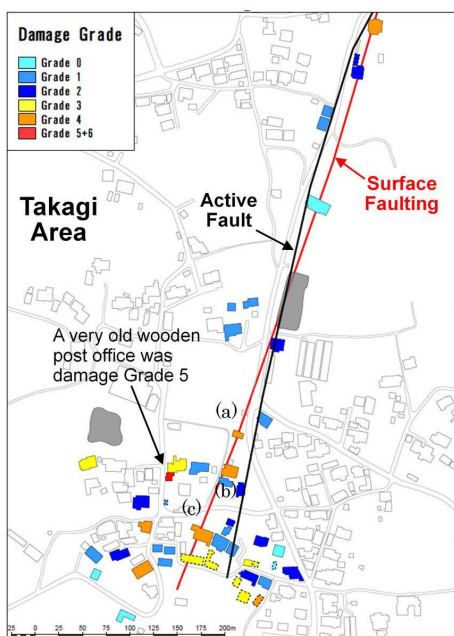


図1 地表地震断層近傍の建物被害分布（高木地区）

表1 地表地震断層近傍の建物被害統計（高木地区）

構造	棟数	割合	築年	棟数	割合
木造	35	90%	30年以上	17	44%
S造	3	8%	30~10年	12	31%
RC造	1	3%	10年以下	10	26%
合計	39	100%	合計	39	100%

古い建物			非常に古い建物		
被害度	棟数	割合	被害度	棟数	割合
Grade 0	0	0%	Grade 0	0	0%
Grade 1	6	50%	Grade 1	5	29%
Grade 2	3	25%	Grade 2	5	29%
Grade 3	1	8%	Grade 3	2	12%
Grade 4	2	17%	Grade 4	4	24%
Grade 5	0	0%	Grade 5	1	6%
Grade 6	0	0%	Grade 6	0	0%
合計	12	100%	合計	17	100%
全壊	2	17%	全壊	5	29%
倒壊	0	0%	倒壊	1	6%

断層直上のみ			断層直上以外		
被害度	棟数	割合	被害度	棟数	割合
Grade 0	1	14%	Grade 0	3	9%
Grade 1	1	14%	Grade 1	15	47%
Grade 2	2	29%	Grade 2	7	22%
Grade 3	0	0%	Grade 3	3	9%
Grade 4	3	43%	Grade 4	3	9%
Grade 5	0	0%	Grade 5	1	3%
Grade 6	0	0%	Grade 6	0	0%
合計	7	100%	合計	32	100%
全壊	3	43%	全壊	4	13%
倒壊	0	0%	倒壊	1	3%



(1) 古い在来木造住宅 (2) 新しい軽量鉄骨住宅 (3) 非常に古い伝統木造住宅
写真1 御船町高木地区における地表地震断層直上の建物被害の例

不確かさを考慮した地震動予測・地震ハザード評価の課題

Consideration of uncertainty in strong-motion prediction and seismic hazard analysis

*藤原 広行¹、森川 信之¹、岩城 麻子¹、前田 宜浩¹

*Hiroyuki Fujiwara¹, Nobuyuki Morikawa¹, Asako Iwaki¹, Takahiro Maeda¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

平成28年熊本地震は、地震本部による長期評価がなされ、震源断層を特定した地震動予測地図が公表されていた布田川断層帯・日奈久断層帯の一部が活動した地震であった。熊本地震の解析より得られた知見を踏まえ、地震動予測・地震ハザード評価における課題、特に、将来の事象の予測における不確かさの取り扱いに関して考察する。予測における不確かさを、偶然的ばらつきと認識論的不確定性に分類して考える。偶然的ばらつきは確率変数として評価され、認識論的不確定性はロジックツリーなど用いて評価される。

(1) 地震規模（地震モーメント）設定における不確かさの考慮

① 震源断層形状のモデル設定の考え方に関する認識論的不確定性の考慮

震源断層の大きさの設定に関して、認識論的不確定性を考慮し、現行のレシピに従った基本モデルに加え、下記のようなモデルを考慮することが必要である。

- ・ 震源断層長さが地表断層長さより長いとするモデル
- ・ 断層下端深さを地震発生層下限よりもやや深くするモデル
- ・ 震源断層の上端を0km（地表）とするモデル
- ・ 傾斜角の設定における不確かさを考慮したモデル

② 震源断層の巨視的パラメータ設定に関する不確かさの考慮

経験的關係式を用いて震源断層モデルのパラメータ設定を行う場合、式の選択に伴う認識論的不確定性や、経験式を用いた予測に含まれる偶然的ばらつきを適切に考慮することが重要である。例えば、下記のような不確かさを考慮することが必要である。

- ・ L-Mo関係、Mj-Mw関係における経験式選択に関する認識論的不確定性
- ・ Mo-S関係、Mo-A関係における偶然的ばらつき

(2) 地表を含む震源断層の位置・形状のモデル化に関する不確かさの考慮

これまでの強震動評価では主として短周期の強震動生成のモデル化に重点を置いており、震源断層は地震発生層内とし、その上端を0km（地表）としていなかった。断層のごく近傍での強震動予測を行うためには、地表地震断層の評価に基づく、上端深さを0kmとした震源断層の位置・形状の詳細なモデル化が必要となる。それに伴い、詳細な位置・形状のモデル化に関する不確かさを考慮することが必要である。

(3) 震源断層モデルの微視的パラメータにおける不確かさの考慮

断層モデルを用いたシミュレーションによる地震動予測では、「平均的な地震動レベル」と「モデルの不確定性に起因する地震動のばらつき」の両方を評価する必要がある。そのためには、震源断層モデルの微視的パラメータにおける不確かさの考慮が必要である。特に、破壊開始点位置、アスペリティ位置、アスペリティの実効応力の不均質さ、地震発生層より浅部でのすべり速度時間関数の設定などに関する不確かさの考慮が重要である。その際、ばらつきを考慮した場合においても、安定してパラメータ設定が可能となるようレシピを改良する必要がある。仮定した断層パラメータのばらつきの物理的根拠や、得られた地震動のばらつきの観測記録等による裏付けも今後の課題である。

シミュレーションを用いて将来の予測を行う場合、過去地震の再現モデルと予測のためのモデル群との関係を明確にする必要がある。再現モデルが予測モデル群にそのまま含まれている必要は必ずしもないが、過去地震の再現モデルから得られる知見を予測のためのモデルの構築にどのように活かすのかが重要なポイントである。

(4) 地下構造モデルにおける不確かさの考慮

震源のモデル化に比べると地下構造モデルの不確かさはほとんど考慮されていない。陸域は浅部・深部統合地盤モデルのように稠密な観測データに基づいたモデルが作成されつつあるが、海域については大きな不確かさがある。1Hz程度以上の高周波数域を計算対象として含む場合には、ランダム不均質などによる偶然的ばらつきを考慮する必要がある。浅部地盤による増幅率の評価においても、データの不足による認識論的不確か性の考慮が今後の課題である。

(5) 固有規模よりもひとまわり小さい地震の考慮

4月14日21時26分頃の地震はM6.5であり、固有規模よりもひとまわり小さい地震と考えられるが、最大震度7が観測されている。現状の確率論的な地震動ハザード評価（全国地震動予測地図）では、こうした地震は、震源断層をあらかじめ特定しにくい地震としてモデル化されており、ハザードの過小評価の懸念がある。固有規模よりもひとまわり小さい地震の地震規模と発生頻度のモデル化も重要な課題である。

キーワード：強震動予測、地震ハザード評価、不確かさ、ばらつき

Keywords: strong-motion prediction, seismic hazard analysis, uncertainty, variability

熊本地震から震災対策を再考する

Reconsideration of earthquake disaster countermeasures based on the experience of the Kumamoto earthquake

*中林 一樹¹

*Itsuki Nakabayashi¹

1. 明治大学

1. Meiji University, Graduate School of Economic and Political Sciences

1. 熊本地震の震災としての特徴

(1) 震度7の複合災害

熊本地震は二度の震度7の地震が28時間の間隔で発生し、二回目の震度7をもたらした地震がM7.3で最大であるということから「本震」となり、最初の震度7を「前震」とした。しかし震災対策の視点からは、二つの震度7の地震の「複合災害」みなすべきである。最初の震度7の地震にどこまで耐えるか、が震災対策の基本であり、震災対策に「前震対策を位置づけるものではない。

(2) 地震と風水害の複合災害

4月中旬に発生した熊本地震は、1か月後からの梅雨前線豪雨から台風シーズンを迎え、復旧が間に合わない事態は予見できた。地震で被災した宅地や斜面の崩壊による複合災害は、地震災害後の緊急対策を、風水害の発生を想定したタイムラインの発想で対策できる。

2. 熊本地震が提示した震災対策の課題

以下は、次の広域巨大地震災害を想定した熊本地震からの課題である。

(1) 事前予防対策の課題

①耐震基準における「地域係数」の課題

地震対策の基本は、事前の耐震対策で被害を軽減することである。災害時の重要拠点施設となる建物はRC構造・S構造であるが、未だ全国には「地域係数」によって耐震設計の基礎である横力の軽減措置がなされている。宮城県沖地震(1978)の後に東北地方の太平洋の件は1.0に改正されたが、東北日本と南西日本は地域係数0.9、0.8、沖縄は0.7である。建築基準法制定以降の主な地震災害の多くが、地域係数が0.9、0.8の地域で発生している。地域係数の改定(1.0に強化)は不可避である。熊本地震の復興では、地域係数1.0で実施されるべきである。

②複合災害に対応する耐震基準の課題

建築基準法において、二度の震度7でも人命を損ねない程度の被災にとどめる耐震基準を設定し、最低限の基準ではなく「望ましい基準」として国民の選択に任すべきである。

③活断層法による住宅の耐震性能の誘導

4,200回を超える余震回数となるような断層帯での熊本地震は、断層帯地震の特性である。断層帯ゾーンの土地利用を長期的にどう誘導するか、長期的戦略として検討すべきである。

(2) 発災直後・緊急対応期の課題

①緊急地震速報の限界と課題

直下地震には緊急地震速報が間に合わないことを周知し、震災対策を普及すべきである。

②余震対策と応急危険度判定調査の課題

応急危険度判定調査は、余震による危険を回避するためであるが間に合わない。自己診断で被災者が緊急危険度を測定し、判断できるようにしていくべきである。応急危険度判定士の業務は、罹災証明のための住家被災度調査として展開すべきである。

③断層帯等余震多発型地震と避難人口増の課題

熊本地震と新潟県中越地震は、内陸の余震の多い地震である。そのために、全村建物1000棟当たりの避難者数は、阪神・淡路大震災の3000人の10倍の30,000人に達している。避難場所は全く足りない状況になり、直接死の約3倍の関連死が発生している。

④避難所の限界と多様化の課題

その結果、避難所は劣悪な居住状況となり、中越でも熊本でも車中泊が多発した。民間施設をはじめ、断層帯近傍地域では、民間施設を含め避難所の多様化を図る必要がある。

災害救助法と震災関連死の課題

避難所・仮設住宅は災害救助法の対象であり、関連死防止対策を充実すべきである。

⑥緊急物資供給の課題

災害救助法による緊急物資の供給は限定的にすべきで、クーポン券の発行による被災地の流通機能の回復を急ぎ、地域復興の第一歩としていくべきである。

(3) 災害対応・仮設居住期の課題

①住家被害調査と罹災証明発行の課題

応急危険度判定士の専門能力を住家被害調査に向け、罹災証明発行の迅速化を図る。

②応急修理制度の課題

見なし仮設住宅のための民間賃貸住宅の応急修理制度が創設されたが、広域巨大災害には、個人所有の住家の応急修理制度（災害救助法）と共に制度拡充していくべきである。

③見なし仮設住宅の課題

見なし仮設住宅は被災地域外への被災者の流出を加速することに十分配慮すべきである。

④ 応急仮設住宅の課題

広域巨大災害を見据えると、熊本地震でのRC基礎の木造仮設住宅は集落内の個別敷地に建設し、コアハウスとして一定期間後に払い下げて、復興住宅化していく制度を創設すべきである。

3. 復旧復興の課題

熊本地震の復興はこれからである。阪神・淡路大震災や新潟県中越地震に比べると、その進捗は遅れている。東日本大震災の被災者の「復興感」調査によると、被災者が復興を感じることに有意な事項は「日常生活の回復」「仕事・収入の確保」「住宅再建の見通し」、「街・集落の復興」である。被災者の復興は避難所、仮設住宅から始まる連続復興の視点と、生活・仕事・住宅・街の総合復興の視点、地域社会の復興を社会基盤とする地域こだわり復興の視点を持って、着実に進めねばならない。

S-wave velocity measurement across active faults and the effect of basin geometry on site response, California, USA

*Koichi Hayashi¹, Mitchell Craig²

1. Geometrics Inc, 2. California State University, East Bay

We measured S-wave velocity (V_s) profiles at eleven sites in the east San Francisco Bay area using surface wave methods. The sites were placed around the Hayward fault and the Calaveras fault (Figure 1). The 30-year probabilities of magnitude 6.7 or greater earthquakes on the Hayward-Rodgers Creek and Calaveras faults have been estimated at 32 % and 25 %, respectively. These faults run through densely populated areas and knowledge of a detailed two- or three dimensional V_s structure along the faults is needed in order to estimate local site effects due to a potential earthquake. This presentation summarizes data obtained by the surface wave methods, shows V_s profiles calculated by inversion, and discusses the effect of 2D V_s structure on surface ground motion. Data acquisition included multichannel analysis of surface waves using an active source (MASW), a passive surface-wave method using a linear array of geophones (Linear-MAM), and a two station spatial autocorrelation method (2ST-SPAC) using long-period accelerometers. Maximum distance between stations ranged from several hundred meters to several kilometers, depending on the site. Minimum frequency ranged from 0.2 to 2 Hz, depending on the site, corresponding to maximum wavelengths of 10 to 1 km. Phase velocities obtained from three methods were combined into a single dispersion curve for each site. A nonlinear inversion was used to estimate V_s profiles to a depth of 200 to 2000 m, depending on the site. Resultant V_s profiles show significant differences among the sites (Figure 2). On the west side of the Hayward fault and the east side of the Calaveras fault, there is a low velocity layer at the surface, with V_s less than 700 m/s, to a depth of approximately 100 m. A thick intermediate velocity layer with V_s ranging from 700 to 1500 m/s lies beneath the low velocity layer. Bedrock with V_s greater than 1500 m/s was measured at depths greater than approximately 1700 m. Between the Hayward Fault and the Calaveras Fault, thicknesses of the low velocity layer and the intermediate velocity layer are less than 50 m and 200 m respectively, and depth to bedrock is less than 250 m. To evaluate the effect of a lateral change in bedrock depth on surface ground motion due to an earthquake, a representative V_s cross section perpendicular to the Hayward fault was constructed and theoretical amplification was calculated using a viscoelastic finite-difference method. Calculation results show that the low frequency (0.5 to 5 Hz) component of ground motion is locally amplified on the west side of the Hayward fault because of the effect of two-dimensional structure. The results of this investigation indicate that the phase velocity information obtained using the 2ST-SPAC method with a limited number of high quality sensors provides valuable V_s information over a wide depth range. It offers a robust alternative to widely-used single station methods such as the horizontal to vertical spectral ratio. Though the 2ST-SPAC method and other passive surface wave methods using an anisotropic or linear array cannot equal the performance of an isotropic array in the case of strongly anisotropic ambient noise, they do provide an effective alternative for many urban environments where ambient noise is relatively isotropic and potential sites for array deployment are limited to corridors along roadways. The inversion of surface wave data is essentially non-unique and we cannot remove uncertainty from analyses, the effect of the uncertainty depends on the purpose of investigation and the use of the data. Several different velocity profiles that yield almost the same theoretical phase velocities were examined to evaluate the effect of uncertainty of inversion on amplification calculation. The results shows that the site amplifications calculated from V_s profiles are relatively insensitive to uncertainties in the velocity profiles.

Keywords: Active fault, S-wave velocity, Surface-wave method, Micro-tremor array measurements, Site amplification, Basin edge effect

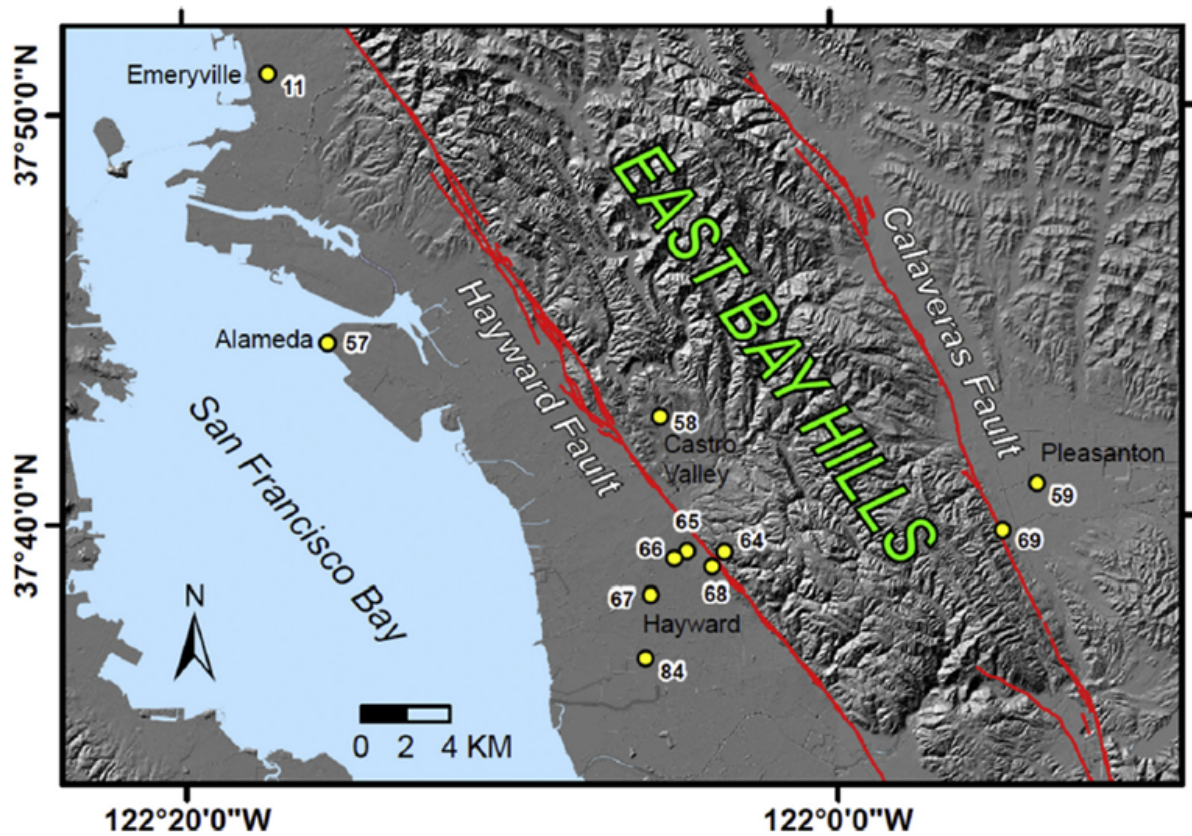


Figure 1. Sites of investigation. 11 : Emeryville, 57 : Alameda, 58 : Castro Valley, 59 : Pleasanton, 64 : CSU East Bay, 65 : Charles Ave, 66 : Huntwood Ave, 67 : Southgate Park, 68 : Cemetery, 69 : Alviso Adobe, 84 : Eden Shores Park.

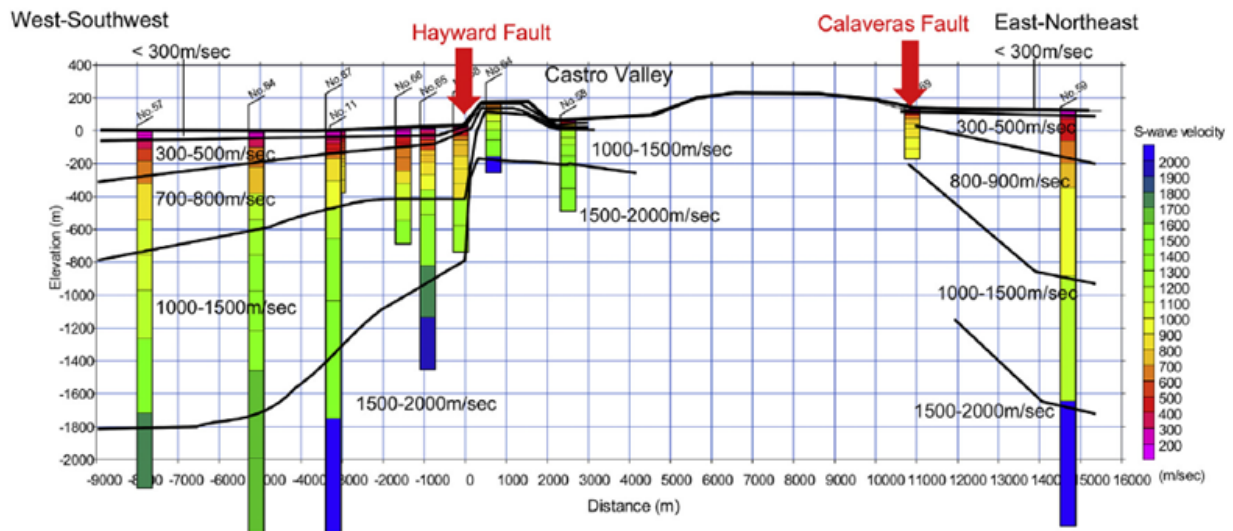


Figure 2. Schematic S-wave velocity section based on the S-wave velocity profiles obtained in this study.

熊本地震で現れた地形変動と地盤災害

Geotechnical aspect of damage found along seismic fault that appeared in the 2016 Kumamoto Earthquake

*小長井 一男¹

*Kazuo Konagai¹

1. 横浜国立大学

1. Yokohama National University

一連の熊本地震のなかで4月16日の本震では、存在が知られていた日奈久断層帯北端部から布田川断層帯にかけて地表地震断層が現れ、これに沿う地盤変形によっても様々な深刻な被害が現れた。この断層に沿う斜面災害も深刻であった。加えて6月20日夜から21日未明にかけて、九州各地を襲った累計500mmにも達する豪雨は、地形変化の現れた断層沿いにさらに深刻な氾濫や地盤災害をもたらし、地震・豪雨の複合災害対応の難しさを浮き彫りにした。

最も地盤災害が顕著な形で現れた阿蘇カルデラの黒川と合流地点、立野火口瀬付近の航空レーザー（LiDAR）観測結果を見ると、崩壊土砂で落橋した阿蘇大橋西背面の植生をはぎ取った地形には今回の本震で崩壊した斜面形状ばかりでなく、過去の崩壊跡も複数確認でき、この場所が古くから同様の地形変化の繰り返されてきた場所であることを物語っている。この火口瀬の狭隘部に集中した国道57号線、325号線、JR豊肥線、九州電力黒川第一発電所に通じる導水路などのライフラインが寸断された。さらに滑落崖背後には、崩落跡に並行して亀裂が走っている状況も確認でき、将来崩壊しかねない不安定な土塊が残存している状況を示している。すなわち、この地形には過去、現在の災害に加え将来のリスクも刻まれているのである。

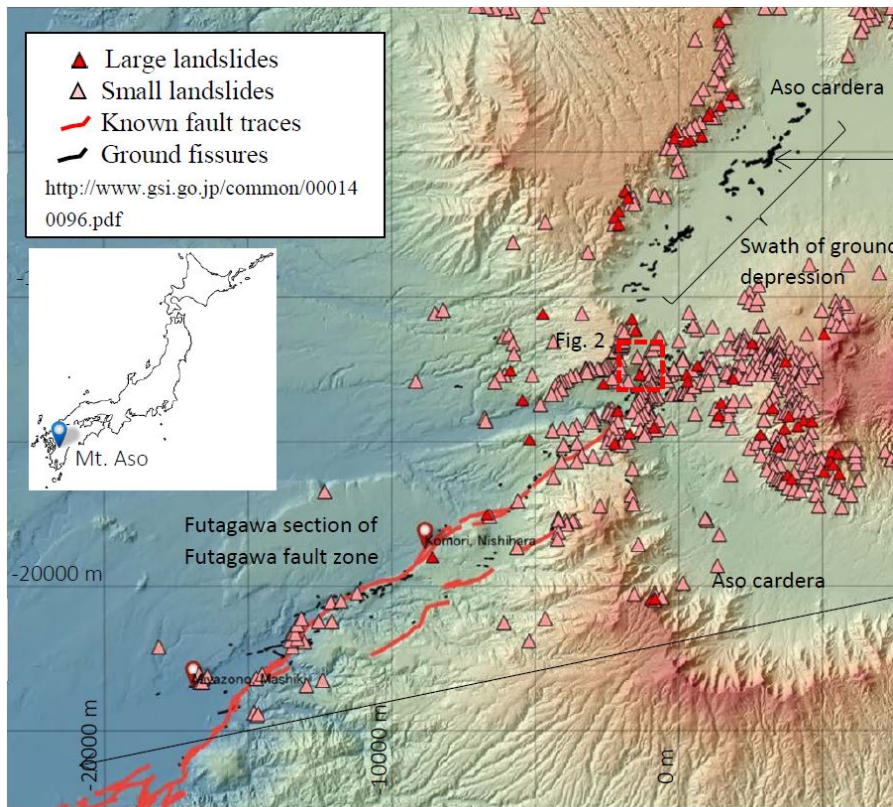
地形を構成する地盤は履歴材料である。磁気テープのように、過去の災害履歴を記録している。この意味では、地形として明瞭に判別できる断層は過去の変動の累積であり、未来の災害への備えを考へることもできるであろう。しかしながら火山が近くにある場合には、こうした過去の“災害記録”は火山灰や軽石など火山噴出物によって覆い尽くされ、長い時の流れの中で過去の記憶は忘れ去られてしまう。30~50m幅で断続的に10km程にわたり阿蘇カルデラ内に現れた陥没帯もその一例である。原因は特定しきれないものの、この陥没は灌漑用水や農地などに深刻な被害を与えた、これらの帯は旧河道沿いに現れたとする見解や、InSARで確認された大きな引っ張りひずみ部分に沿って現れたとする見解もあってその理由はまだ十分に特定しきれない。米国GEER (Geotechnical Extreme Event Reconnaissance)の調査メンバーらによるUAV撮影画像からの3次元地形情報は、陥没帯の一部が黒川の支流、乙姫川を渡る橋梁付近 (32.9511°, 131.0275°) をかすめている様子を示しているが、橋梁部分が相対的に沈下している様子がなく、この箇所も含め、数少ない橋梁支持形式の構造物がどう陥没帯の中で挙動したのか、その地盤データも含めて更なる調査が必要であろう。この場所のわずか数百メートル西側に、弥生時代の小野原遺跡群があって、ここで陥没帯と思われる正断層的な変形が現れていたことは、過去にも同様の地形変動があった証左かもしれない。

断層沿いに現れた明瞭な地変に比べると秋津川、木山川の氾濫原平野に明瞭な地形変形の痕跡は一見して見当たらない。しかし航空レーザー測量による地震前後のデジタル標高モデルを比較すると木山川沿いの平地で1mを超える沈下が現れたことがわかる。この地域は6月20日から21日未明にかけての豪雨で浸水した。増水した木山川の水が左岸堤防を越流したのである。この地盤の沈下は地殻変動の影響を反映したものかもしれない。また一部には液状化の沈下の影響もあるのかもしれない。いずれにしても広域の地盤の沈下は洪水への脆弱性を増す結果につながった。この氾濫原の中程の秋田配水場の近くで、4本の柱に支えられた上水井戸ポンプの複数のRC建屋がおよそ1°~2°の範囲で傾いた。深さ170 mから200 mまで根入れされた鋼製井戸シャフトが、各々の建屋床の中央ではなく4隅の一つに大きく偏心した状態で固定されていて、そこから最も遠方の

建屋コーナー部に向かって傾いている。四隅の柱の基礎は、それぞれ長さ20 mの中間支持PC杭2本で支えられていて、この杭は有機質粘土層を貫き軽石混じりの砂層に達している。井戸の鉄製ケーシングがストラット（突っ張り棒）として働く一方で、これらのPC杭が有機質粘土層とともに沈下したのであれば5つの井戸建屋の全ての傾きの方向が説明できる。このことは中間支持杭の根入れ深さ20 mと井戸の鋼製ケーシングの最下端の170~100 mの間の地盤のどこかが縮んだ可能性を暗示しているのかもしれない。

キーワード：2016年熊本地震、地盤災害、地震・洪水複合災害

Keywords: Kumamoto Earthquake of 2016, Geotechnical hazard, earthquake-flood multi hazards



House hanging a little over the northwestern offset of the ground at N32.9568°, E131.0368



Tilted RC housing of pump for Akita clean water well No. 2 at N32.7670°, E130.7786 °: A low lying area east of this housing is found sunken by more than a meter

2016年熊本地震で流下・堆積した阿蘇火山西部の崩壊堆積物 Geomorphological and geological features of landslide deposits caused by the 2016 Kumamoto earthquake at the western part of Aso Volcano

*西山 賢一¹、鳥井 真之³、奥野 充²

*Ken-ichi Nishiyama¹, Masayuki Torii³, Mitsuru Okuno²

1. 徳島大学大学院理工学研究部、2. 福岡大学理学部、3. 熊本大学大学院自然科学研究科

1. Graduate School of Science & Technology, Tokushima University, 2. Faculty of Science, Fukuoka University, 3. Graduate School of Science & Technology, Kumamoto University

2016年4月に発生した熊本地震 (Mj=7.3) では、特に震央に近い阿蘇カルデラ内の斜面で多数の地すべり・斜面崩壊が発生した。それらの地形・地質に関する予察的な調査結果を報告する。

阿蘇カルデラ西部の高野尾羽根溶岩ドームの斜面では複数の地すべりが発生した。西側斜面で発生した地すべりは、移動体の形状から複数の移動ユニットに区分でき、アースフローと推定されている (奥野ほか, 2016)。すべり面には、草千里軽石 (Kpfa, 31 cal ka BP), ならびにAT (29 cal ka BP) が分布している。一方、高野尾羽根火山の北斜面で発生した地すべりは、西側斜面の地すべりよりも急斜面で、すべり面で観察されるKpfaの分布は断片的である。側方崖の末端付近では、覆瓦状構造をなす変形したK-Ahおよびローム層が認められ、上位を黒ボク土に覆われている。この覆瓦状構造は、2016年より前の地すべりによって形成された変形構造と推定され、移動体の給源は2016年地すべりの西隣に見られる旧滑落崖地形であろう。地すべりの発生時期は確定できていないが、K-Ah降下後～黒ボク土の生成前と推定される。

草千里ヶ浜火口の南にある烏帽子岳 (1,337m) と、その西方にある975mのピーク (小烏帽子岳) では、斜面の大半で崩壊・地すべりが発生した。これらの斜面は主に溶結火砕岩 (アグルチネート) から構成されており、その上位には、KpfaやATを含むローム層が堆積している。溶結火砕岩の上位を覆うローム層が薄い場所では、これらが一掃されるような崩壊が発生している。一方、杵島岳スコリア (KsS, 3.7 cal ka BP), 往生岳スコリア (OjS, 3.0 cal ka BP), Kpfaなどが累積している比較的緩傾斜の斜面では、これらの厚いローム層の中をすべり面とする地すべりが発生している。これらの発生源は、中央火口丘の西に流下する河川では最も流域面積が広い山王谷川の源流域にあたる。山王谷川の源流部には多量の地すべり土塊が残存しているほか、流下した土砂の一部は河道から越流し、住宅・農地に被害を与えた。主要な崩壊源である小烏帽子岳山頂北斜面から、堆積物末端 (南阿蘇村長野) までの水平 (曲線) 距離Lは約4.2km, 比高Hは約0.61km, 等価摩擦係数 (H/L) は0.145となった。豪雨・融雪時ではない地震動による土砂移動としては、非常に長距離を流下したことが特徴的である。その後、2016年6月20-21日の豪雨 (総雨量約600mm) により、山王谷川では、安山岩やアグルチネートの巨礫を含む土石流が流下し、溪流内に残存していた4月16日に流下した堆積物を大きく侵食・削剥した。

キーワード：熊本地震、阿蘇火山、地すべり

Keywords: Kumamoto earthquake, Aso volcano, landslide

国土交通省都市局による益城町市街地の活断層調査の意義

Reserach on active faults in urbanized area of Mashiki Town by the City Bureau, MLIT and its significance

*熊木 洋太¹、宇根 寛²

*Yohta KUMAKI¹, Hiroshi Une²

1. 専修大学文学部、2. 国土地理院

1. Senshu University, 2. Geospatial Information Authority of Japan

2016年熊本地震により壊滅的な被害を受けた益城町市街地の復興支援の一環として、国土交通省都市局市街地整備課では、ピット掘削（写真参照）を含め、活断層の存在の確認とその位置の特定のための調査を行った。その結果を紹介するとともに、市街地において地震時に微小な地変が生じた地域での活断層調査の意義について述べる。



益城町復興計画における活断層の位置づけ

Consideration of existence of active faults in the Reconstruction Plan of Mashiki Town

*宇根 寛¹

*Hiroshi Une¹

1. 国土地理院

1. Geospatial Information Authority of Japan

平成28年熊本地震により壊滅的な被害を受けた益城町では、震災から復興し、災害に強いまちを築いていくための益城町復興計画を平成28年12月に策定した。その過程で行われた住民アンケートでは、多くの住民が、断層の存在や将来の地震の発生に対する不安があると答えている。この計画策定と並行して、国土交通省都市局では、断層、地盤などの被害要因の調査・分析を行うとともにこれを踏まえた市街地復興のための安全対策のあり方の検討を行い、益城町に情報提供を行った。その中で、益城町市街地中心部を東西に縦断する少なくとも3本の活断層を推定し、町の中心部で土地区画整理事業等により面的な市街地整備を行う際には、事業の計画を、被害リスク回避の観点から活断層上の土地利用に配慮したものとするよう提案している。具体的な土地利用計画等の策定はこれからであるが、活断層の性質を正しく理解し、活断層と共存するまちづくりを目指した取組みとして注目される。

キーワード：益城町復興計画、活断層上の土地利用、活断層との共存

Keywords: Reconstruction Plan of Mashiki Town, land use on active fault, coexistence with active fault

益城町市街地内における活断層の位置

層位置の推定方法

以下の4点から総合的に判断

- ①同一地層の標高差の有無
- ②明瞭な段差地形の有無
- ③活断層の繰り返しにより柔らかくなった地盤の有無
- ④地表に現れる連続的な亀裂の有無

- 益城町市街地において、3本の活断層(A・B・C)が存在。
- 今回の地震では、**活断層Aが主体に活動し、益城町市街地では、最大35cmの右ズレ及び最大15cm程度の上下変位(南落ち)を確認。**
(活断層B,Cのズレは活断層Aに比べて微量)



国土交通省都市局(2017):「熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する中間報告」より

清正公道と阿蘇カルデラ北西部に現れた2016年熊本地震の地震断層 Earthquake faults along the Kiyomasa-kodo and in the northwestern part of the Aso caldera during 2016 Kumamoto Earthquake

*渡辺 満久¹、中田 高²、後藤 秀昭³、田中 圭⁴、鈴木 康弘⁵、高田 圭太⁶

*Mitsuhisa Watanabe¹, Takashi Nakata², Hideaki Goto³, Kei Tanaka⁴, Yasuhiro Suzuki⁵, Keita Takada⁶

1. 東洋大学社会学部、2. 広島大学名誉教授、3. 広島大学大学院文学研究科、4. 一般財団法人 日本地図センター、5. 名古屋大学、6. 復建調査設計株式会社

1. Faculty of Sociology, Toyo University, 2. Emeritus professor, Hiroshima University, 3. Graduate school of letters, Hiroshima University, 4. Japan Map Center, 5. Nagoya University, 6. Fukken Co. Ltd.

1 はじめに

2016年熊本地震本震時(4/16)には、布田川?日奈久断層帯に沿う地域以外にも、大津町高尾野付近から阿蘇カルデラ北西部の低地にかけて、断続的ではあるが西南西?東北東方向に配列する断裂や開口亀裂などが確認された(中田ほか、2016、地震学会; 渡辺ほか、2016、活断層学会)。これらの地変は、1997年と1999年に南西方向に正断層性の右横ずれ地震帯が形成された二重峠地震帯(須藤・池辺、2001、京大防災研年報)に沿うように現れている。本発表では、これらの断裂などの特徴と地震被害を検証する。調査には平成28年度科学研究費補助金(特別研究促進費)「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(課題番号: 16H06298、研究代表者: 清水 洋)を使用した。

2 二重峠地震帯とその延長部に沿って出現した断裂(地震断層)と地震動

(1) 清正公道に沿う地震断層: 新小屋町においては、右ずれ型の小規模なpull-apart basinが形成されており、地震断層の鉛直方向の断層変位量は最大で8cm程度である。南落ちの地震断層は、数10m以上東へ連続している。消防団倉庫付近では、最大で10cmの南側隆起の断層変位が認められ、約5cmの右ずれ変位が確認できる。地震断層は少なくとも120m以上は連続しており、付近の家屋の損傷は著しい。高尾野水道記念碑~清正公道碑では、碑と東屋がすべて北方向に倒壊し、埋設された石柱が飛び出したり傾斜したりしている。この付近では、最大で10cm以上の北側隆起の地震断層が確認できる。外輪山山頂部付近、豊後街道と県道23号線が交わる地点においては、2cm程度の右ずれが生じている。

(2) 阿蘇カルデラ北西部: 幅約100m、長さ150-200mの範囲に、N60~75E走向で段差を伴う数条の顕著な断裂が認められる。本発表では旧河道に沿って現れた断裂などは扱っていない。カルデラ壁直下(阿蘇市殿塚)では、水田や道路に数10cmの北落ちの変位が認められる。阿蘇西小学校の北方や阿蘇市狩尾の乙姫川東岸には、断裂に挟まれて連続性の良い地溝状の凹地が認められる。凹地の比高は最大で2m程度である。右横ずれ変位が系統的に認められるところもある。阿蘇町広瀬付近では、県道175号線を横切って、NE-SW方向、比高約1.5mの地溝が形成されている。内牧のパチスロ店の駐車場からホテル角萬に延びる断裂は、南西側では北西落ちで最大1m弱程度、北東側では南東落ちで最大1m強程度であり、上下変位の向きが入れ替わる蝶番的なずれを示す。

(3) 墓地などの被害: 益城町~西原村~大津町~南阿蘇村~阿蘇市内牧の地域において、墓地等の被害状況を検討した。布田川-日奈久断層近傍においては、墓石の台座までが倒壊するような非常に強い揺れがあったことが確認できた。既知の活断層から北へ遠ざかると被害の程度は小さくなるが、清正公道(大津町高尾野~二重峠)付近において再び被害は大きくなるように見える。南阿蘇村の被害も甚大であるが、阿蘇カルデラ北西部では墓石の被害は目立たない。上記した三久保付近では、地溝を形成した断層は墓地も横切っているが、極めて不安定なものを除いて墓石の転倒はみられない。また、周辺の家屋にも顕著な被害はない。内牧周辺においても、断裂直上を除けば、墓石や家屋に目立った被害はない。

3 震災の帯・断裂の成因

清正公道では、熊本地震本震時に、右ずれを伴う断層活動があった。この地震断層近傍では、家屋の被害や

石碑等の倒壊状況も顕著であり、震災の帯が形成されている。これは、強い地震動が狭い範囲に発生したことを示しているものであり、浅いところから強震動が発生している可能性が高い。布田川-日奈久断層帯に沿う地域においても、同様の指摘が可能であろう。

阿蘇カルデラの北西部に出現した顕著な断裂は、二重峠断層に沿って断続的に連続している。その成因に関しては、地震動による地盤の破壊といった可能性も指摘されている（石村・遠田，2016、連合大会）。しかし、上記した断裂は表層の軟弱地盤とは関連しておらず、本発表で取り上げた断裂の発達と地盤条件に関連性はない。また、この地域では強い地震動は発生しておらず、強震動による地盤変動があったとは考えにくい。落ち込みを伴う断裂は、1983年Borah Peak地震M7.3（Crone et al., 1987, BSSA）や1987年Edgumbe地震M6.5（Beanland et al., 1989, NZJGG）などの海外で発生した正断層型地震に伴う地震断層の形態と類似している。阿蘇カルデラ北西部においては、本震発生時に強震動を伴わない断層変位によって地溝が形成されたと考えられる。

なお、応用地質学会（2016、調査報告速報版）では、阿蘇カルデラ北西部の断裂から北の部分1～2km四方の表層地盤が一体となって側方流動したことが指摘されている。これは、上記の結論と矛盾するものではない。側方流動の起点となる断裂が、地下浅部の断層変位によってもたらされた可能性が高い。

キーワード：地震断層、右横ずれ断層、正断層、清正公道、阿蘇カルデラ、2016熊本地震

Keywords: earthquake fault, right-lateral fault, normal fault, Kiyomasa-kodo, Aso caldera, 2016 Kumamoto earthquake

2016年熊本地震における益城町被害集中域の地震動増幅特性 Ground motion amplification on heavily damaged zone in the Mashiki town during the 2016 Kumamoto Earthquake

*後藤 浩之¹、吉見 雅行²、秦 吉弥³

*Hiroyuki Goto¹, Masayuki Yoshimi², Yoshiya Hata³

1. 京都大学防災研究所、2. 産業総合技術研究所、3. 大阪大学

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Osaka University

平成28年（2016年）熊本地震では、震災関連死を含む150名超の人的被害、そして建築物やインフラ施設等にも多くの被害があった。熊本県下では8000棟を超える住宅が全壊し、中でも益城町はその約3割に相当する2700棟あまりが全壊した。建築学会が実施した悉皆調査によると、益城町の市街地では旧耐震基準の木造住宅の約45%が大破・倒壊し、また2000年以降に建てられた木造住宅も7棟が倒壊している。このような甚大な被害が益城町の市街地に集中して表れた原因について、様々な研究調査が進められてきた。

益城町の被害集中域では本震の地震記録が得られている（Hata et al., 2016）。被害集中域の内外で記録を比べると、最大速度や1秒付近の加速度応答スペクトル値に差が認められることから、建物に作用した地震動そのものが異なると考えられた。被害集中域は段丘に位置するが、ボーリング調査（吉見他, 2016）によると軟弱な火山灰質粘土、凝灰質砂、凝灰質砂礫が50mほど堆積している。Goto et al.(2017)はボーリング調査結果に基づいて表層地盤モデルを作成し、1次元地盤応答解析を行うことで、被害域内外で記録された本震の地震動を良好に再現した。Goto et al.(2017)では本震の地震動を再現するにあたり、工学的基盤で同一の地震動が入力したとする仮定をおいた。このため、地震動の再現結果が尤もらしいとするならば、被害域の内外でほぼ同一の地震動が表層地盤に入射したと考えられる。すなわち、表層地盤の違いが地震動の違いをもたらす、ひいては建物被害の違いをもたらしたと考えられる。

また解析の結果、地盤材料のひずみ依存性によって表層地盤が非線形化し、地盤の応答関数のピーク周期が1秒付近に推移（長周期化）していた。このため、表層地盤の非線形応答の違いが1秒付近の地震動成分を強調させたことによって、被害をもたらすような地震動の違いが顕在化したと考えられる。実際、余震観測や常時微動測定の結果（秦他, 2017など）によると、被害集中域の内外で振動特性の違いを把握することは難しいようである。被害をもたらすような地盤の特定を、事前にどのように進めるかが今後の重要な課題であると言える。

キーワード：2016年熊本地震、地盤震動、益城町

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, Ground amplification, Mashiki town

2016熊本地震での地表亀裂と被害

Clarification of the relationship between the damage distribution and surface cracks caused by the 2016 Kumamoto earthquake

*原口 強¹

*Tsuyoshi Haraguchi¹

1. 大阪市立大学大学院理学研究科

1. Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University

2016年熊本地震では、建物の壊滅的被害は活断層沿いに集中した。地震にともない、様々な地表変位が現れた。本発表では、地震で現れた地表変位と被害について具体的な事例を示して議論する。

活断層が認定されていた益城町低地南縁には、明瞭な地表地震断層が現れた。断層変位による基礎や擁壁の破壊がみられる。しかし、倒壊した建物はない。地表地震断層が出現した近傍の古い木造家屋では、屋根瓦の落下もなく、外見上の無被害建物が多く見られる。地表地震断層はブロック塀を変位させ、破壊した。しかし直接の被害幅は数m程度であった。益城町市街地は壊滅的な建築物被害となった。市街地には、地表地震断層が現れた。道路の白線や建物基礎の食い違いが見られた。右ズレ変位量は最大40cmで西側に向かって消滅する。しかし、地表地震断層の出現位置と倒壊家屋は必ずしも一致しない。阿蘇カルデラ内、南阿蘇村河陽・黒川地区でも地表地震断層が現れた。断層の一部は建物を変位させたが、建物は倒壊していない。さらに阿蘇谷では、直線的な陥没地割れが発生した。向山らは、黒川沿いの内牧、狩尾、的石の3地区で長径1~2km四方のブロックが北~北西方向へ2~5m移動したことを、変位ベクトル解析から明らかにした。的石地区の微動探査結果、地割れの直下の厚さ約10mに低速度層を確認した。古老の話では、地割れ部分近傍では1940年以前に黄土採取が行われていたとのことである。これらを総合する、緩い採土跡地が地震動により流動化・沈下した結果、黒川の下刻で開放地盤となる黒川までの地盤ブロックは南北両側の地盤の支えがなくなり、地震動により緩やかに北傾斜する地形に沿ってすべったと判断される。

以上の通り、活断層が引き起こした熊本地震では壊滅的な被害が地震断層近傍に現れた。しかし、断層変位による被害に着目すれば、被害は極めて限定的であることが事例から示された。

キーワード：2016年熊本地震、活断層

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, active fault

2016年熊本地震の地震断層の分布形状と家屋被害

Geometry of surface fault ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake and house damages

*中田 高¹

*Takashi Nakata¹

1. 広島大学

1. Hiroshima University

2016年熊本地震は、主として既知の布田川-日奈久断層の北半部の活断層の再活動によって引き起こされたものであるが、活断層が認定されていなかった場所にも顕著な地震断層が出現した。この地震の特徴の一つとして、甚大な被害が地震断層から数百メートル以内の範囲で発生したことが挙げられる(藤原, 2017など)。本報告では、地震断層の分布形状と建物被害の分布の特徴について解析し、地表において破壊的な揺れの発生場所を活断層の分布形状をもとに予測する手法を検討する資料とする。

熊本地震の地震断層の分布については、大学共同調査チーム(熊原他, 2016)や産総研(Shirahama et al., 2016)などによってまとめられており、布田川断層北部に沿った右横ずれ断層、布田川断層の南に位置する出ノ口断層などに沿った正断層のほかに、益城町上陳から益城町市街地にかけて右横ずれ断層や益城町下陳から北西に伸びる左ずれ断層が沖積低地に新たに出現した。さらに、布田川断層の北東延長部の南阿蘇村黒川周辺では右横ずれ断層や正断層、阿蘇カルデラから南西に延びる二重峠地震帯(須藤・池部, 2001)に沿って、カルデラ内北西部低地では複数の平行する正断層からなる地変、大津町高尾野では小規模な断層が出現するなど、多様で複雑な地震断層が認められた。

巨視的に見ると、被害は震源域から遠ざかるほど地震の揺れは小さくなり家屋被害が小さくなるという傾向が認められるが、微視的にみると震源域の大きな家屋被害は地震断層直上と地震断層に沿った狭い範囲に偏在・集中する。前者は断層のずれによる建物破壊であり、地震断層直上に位置している家屋に普遍的に認められるのに対して、後者は地震断層に沿ってどこにでも認められる訳ではなく、益城町木山地区、南阿蘇村黒川地区などの横ずれ変位が卓越する地震断層の末端部に偏在する特徴がある。このような場所では、地震断層とほぼ一致する走向に延びる数多くの亀裂が集中的に地表に出現しており、小規模な「震災の帯」あるいは「亀裂集中帯」とも言える狭い範囲で甚大な被害が集中的に発生している。布田川断層とそれから分岐する地震断層は、益城町藤堂付近から南と北に向かって分岐する平面形状を示しており、中田他(1998)の破壊伝播予測モデルに対応して、これらの被害集中地域ではディレクティブティ効果による地震動の増幅が起こったとも考えられる。しかし、このような断層破壊過程は、地震波形をから提示された震源過程のモデル(京都大学防災研究所, 2016・防災科学技術研究所, 2016など)と一致していない問題が存在する。

今回の地震で、布田川断層の地震断層の近傍で大きな建物被害が発生した区間は限られ、被害の少なさの方が目立った。特に横ずれが卓越する断層の直線的なトレースでは、極近傍でも建物が倒壊した例は殆どなかった。これは、断層破壊がスムーズに伝播したことを暗示している。これに対して、益城町平田周辺などの地震断層がステップするなど破壊の伝播が阻害されるような場所では建物被害が目立ち、地震動が局地的に大きくなった可能性がある。これに対して、左横ずれ変位を伴う地震断層が分岐する場所では建物被害が特に大きいという傾向は認められなかった。

一方、布田川断層の南に平行する出ノ口断層などの正断層変位が卓越した地震断層に沿っては、断層直上を除けば建物の倒壊は認められず、これらの断層に沿っては破壊的な地震動は発生しなかったと言える。

正断層変位が卓越する地震断層は、阿蘇カルデラないで幅広い断層帯を形成している。ここでも、断層直上の家屋被害は顕著であるが地震動は比較的小さく、断層近傍の墓地でも墓石の転倒も軽微であることが確認されている。南阿蘇村黒川地区の甚大な建物被害が発生した集落の南のゴルフ場や別荘地でも、数条の平行する正断層性の地震断層が出現した。ここでも、地盤破壊に伴う家屋被害は顕著であったが、地震動による家屋被害は比較的軽微であった。

このように、地震断層に沿っては強い地震動が発生する場所とそうでないところがあり、その場所を断層の分布形状からある程度推定することが可能であることがわかった。また、甚大な建物被害は、地震断層から数百メートル以内の幅狭い範囲に集中することから、破壊的な強振動が地震断層に沿って地下の極浅部から発生したと考えることができる。

キーワード：熊本地震、断層の分布形状、家屋被害

Keywords: Kumamoto earthquake, fault geometry, house damage

熊本地震おけるリアルタイム被害推定—実証された性能と課題— Real-time Damage Estimations for the 2016 Kumamoto Earthquakes by J-RISQ

*中村 洋光¹、藤原 広行¹、高橋 郁夫¹、門馬 直一¹、本間 芳則²

*Hiromitsu Nakamura¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Ikuo Takahashi¹, Naokazu Momma¹, Yoshinori Homma²

1. 防災科学技術研究所、2. 三菱スペース・ソフトウェア

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2. Mitsubishi Space Software

防災科学技術研究所では、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の課題「レジリエントな防災・減災機能の強化」において、災害発生直後の初動対応の意思決定支援等に資することを目的として、大地震のような広域にわたる災害が発生した場合でも被害全体をリアルタイムに推定、状況を把握することを可能とするリアルタイム被害推定・状況把握システムの研究開発を実施している（以下、J-RISQと呼ぶ）。本研究では、最大震度7を観測した2016年4月14日のM6.5の地震（以下、M6.5地震と呼ぶ）及び、4月16日に発生したM7.3の地震（以下、M7.3地震と呼ぶ）におけるリアルタイム被害推定の状況と課題について報告する。J-RISQにおける被害推定に必要な入力地震動は、強震観測網（K-NET及びKiK-net）に加えて、地方公共団体や気象庁の計測震度データ等の地震動データを受信し、地震ハザードステーションより提供されている地盤増幅率や関東地域を対象とした広域地盤モデルによる地盤増幅率を利用し、震度、最大加速度、最大速度、SI値、速度応答スペクトル等の250mメッシュでの地震動分布を推定する。このように推定した震度分布をもとに、昼間、夜間、時間帯別滞留人口を利用した震度曝露人口を求める。また、推定した地震動分布、構造・築年数・階数を考慮した全国建物モデル（全国約5,600万棟の建物をモデル化）を利用し、建物被害関数を適用することで250mメッシュ毎および市区町村毎に集計した建物全壊棟数や全半壊棟数等の建物被害をリアルタイムに推定する。なお、それぞれの構造種別や被災度に対して複数の被害関数を適用し、それらの組み合わせによって5つのパターンの手法を適用し、推定結果に幅を持たせることを試みている。これらの被害推定は、概ね震度3程度以上検知した場合に処理を実施し、1地震に対し複数回処理する。第1報は地震検知後概ね1分程度以内、最終報は地震検知後概ね15分程度以内に情報提供することを目標としている。こうして得られるリアルタイム推定情報の一部（推定震度分布や震度曝露人口等）は、「J-RISQ地震速報」として、概ね震度3以上を観測した地震に対して、地震発生直後よりWEB公開を行っている

(<http://www.j-risq.bosai.go.jp/>)。M6.5地震においては地震発生から約29秒後にJ-RISQは第1報を発信し、約10分間で7報を発信した。最終的には、1091観測点の震度データを用い、震度6弱以上の曝露人口が約62万人、震度6強以上の曝露人口が約29万人、建物被害推定結果は全壊棟数が約6千～1万4千棟程度、半壊棟数は約7千～3万3千棟程度であった。建物被害の分布としては、江津湖の東側から益城町宮園地区にかけて長さ7km、幅1km程度の細長い領域に被害が集中する結果であった。

M6.5地震から約28時間後に発生したM7.3地震では、地震発生から約29秒後に第1報を発信し、約11分間で8報を発信した。最終的には、2389観測点のデータを用い、震度6弱以上の曝露人口が約113万人、震度6強以上の曝露人口が約66万人、建物被害推定結果は全壊棟数が約1万2千～3万1千棟程度、半壊棟数は約1万6千～7万9千棟程度であった。（後に入手した益城町宮園及び西原村小森の震度データを加味して再推定を行ったところ、全壊棟数が約1万6千～3万8千棟程度、半壊棟数は約1万8千～8万8千棟程度）被害の分布としては、M6.5地震と同様の領域に加え、熊本市の東区や中央区等の広い領域で建物被害が多い地域が推定された。これらの推定結果を、自治体の被害報告や門馬・他（本大会）の空中写真を用いた建物判読等の実被害と比較すると定性的な空間分布は概ね整合する一方で、被害の量は実被害を過大に評価している傾向が見られた。また、門馬・他によるとM6.5地震で被災した建物がM7.3地震によりさらに被害程度が進行する例が多数見られた。今後これらの課題を踏まえた被害関数や推定アルゴリズムの改良を行う予定である。

謝 辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施された。また、地方公共団体及び気象庁の震度データは気象庁より提供して頂いている。

キーワード：熊本地震、リアルタイム被害推定、J-RISQ

Keywords: Kumamoto earthquake, Real-time Damage Estimation, J-RISQ

2016年熊本地震の断層周辺における浅部・深部統合地盤モデルの構築 Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation during 2016 Kumamoto earthquake.

*先名 重樹¹、神 薫¹、若井 淳¹、東 宏樹¹、内藤 昌平¹、森川 信之¹、前田 宜浩¹、岩城 麻子¹、山田 隆二¹、河合 伸一¹、松山 尚典²、藤原 広行¹

*Shigeki Senna¹, Kaoru Jin¹, Atsushi Wakai¹, Hiroki Azuma¹, Shohei Naito¹, Nobuyuki Morikawa¹, Takahiro Maeda¹, Asako Iwaki¹, Ryuji Yamada¹, Shinichi Kawai¹, Hisanori Matsuyama², Hiroyuki Fujiwara¹

1. 防災科学技術研究所、2. 応用地質

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2. OYO Corp

1. はじめに

平成28年熊本地震においては、益城町において4/14の前震(Mjma6.5)と4/16の本震(Mjma7.3)の2度にわたって震度7を観測し、断層近傍の住宅等に大きな被害を及ぼした。住宅等建物被害の分布¹⁾においては、およそ本地震の地表地震断層²⁾近傍に被害が集中している傾向が確認されたが、断層直上であっても被害が少ない場所や、断層から離れていても被害が比較的大きな場所も確認されている。これらの現象は、地盤構造に起因する可能性が高いとの指摘もある。

そこで、被害が大きい断層近傍の熊本平野を中心とした地域において、ボーリングデータの収集による初期地質モデルの構築、および、微動観測および地震観測記録の収集によるS波速度構造モデル高精度な地盤モデルを構築し、建物被害分布との比較・検討を行った。

なお、地盤モデルの構築においては、内閣府SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」の⑤「リアルタイム被害推定・災害情報収集・分析・活用システム開発」のテーマの1つである「地震被害推定のための地下構造モデルの構築」において実施している。

2. データの収集

ボーリングデータについては、九州地盤情報共有データベース（第1版・第2版）、熊本県および市町村からの提供、熊本市地盤図、平成28年熊本地震復興支援ボーリング柱状図緊急公開サイト²⁾のデータを収集した。地震観測記録については、熊本県の震度計の地震波形データを収集した。

微動観測については、主に工学的基盤(Vs400程度)までを極小アレイ観測で、地震基盤(Vs3000程度)までを半径800m(400m,200m,100m,50m,25m)、の4点のアレイにて実施し、極小アレイ観測は、アレイ半径60cmの「4点極小アレイ」および1辺5m~10m超の「3点不規則アレイ」の組み合わせで実施している。これらの観測は、地震観測点(K-NET, KiK-net, 自治体震度計および気象庁)付近や公道上などで実施している。アレイは約5km間隔以内で26地点、極小アレイは約1km間隔(益城町周辺は100~500m間隔以内)約500地点において実施した。観測機材としては、一体型常時微動観測機材JU410⁴⁾を用いて、約1~2km間隔で各地点15分間の観測を行った。また、サンプリング周波数は200Hzとした。

3. S波速度構造解析(モデル構築)および結果の概要

本検討の微動解析については、近年の研究⁵⁾で提案・高度化されている浅部地盤探査手法等により、1次元S波速度構造の評価を行った。極小アレイの解析については、微動解析ソフト「BIDO2」「クラウド型微動観測システム」⁴⁾等を用いて、H/Vスペクトル比および位相速度を求め、分散曲線の深度変換(SPM)⁶⁾および逆解析(Pelekis and Athanasopoulos(2011)⁷⁾およびArai and Tokimatsu(2004)⁸⁾等)を行ってS波速度構造を求めた。アレイの解析については、SPAC法とGAおよびArai and Tokimatsu(2004)を参考にしている。モデル作成においては、1次元S波速度構造や2次元S波速度構造断面および深度平面分布等にて、初期地質モデルと比

較・検討した上で、3次元地盤モデルに展開している。作成した地盤モデルによる応答解析結果等により、特に益城町の断層直上付近の被害集中地域において、1.75Hz~3Hzを示す地域に「全壊」の割合が多く、1.75Hz未満の地域には比較的被害が少ないこと等が分かった。また、1.75Hz未満の地域ではAVS30が100~180(m/s)、1.75Hz以上では180~270(m/s)であり、線形増幅倍率は前者の方が大きくなるが、実際の建物被害は後者の方が大きくなっていることが分かった。

4. まとめ

本検討では、熊本平野周辺において、ボーリングデータに基づいた地質モデルを作成した上で、地震観測および微動観測で得られた解析結果に基づき、3次元S波速度構造モデルを作成した。作成した地盤モデルのS波速度構造分布や卓越周期分布と被害分布の間には一定の相関が認められる。しかしながら、地盤モデルを用いた強震動計算による被害推定を行い、建物被害と調和的な結果を得るには、非線形特性を考慮する必要があると考える。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されました。産総研の長郁夫博士、（株）サイスモ・リサーチの司宏俊博士、神奈川大学の荏本孝久教授には、微動観測データ等を御提供いただいた。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 門馬直一, 藤原広行, 中村洋光, 佐伯琢磨, 下村博之, 山田哲也, 藤澤誠二 : 平成28年熊本地震における益城町の震度分布と建物被害の関係, 日本地震工学会年次大会, O1-2, 2016.
- 2) Y. Shirahama et al : Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan : *Earth, Planets and Space*, 68:191 DOI 10.1186/s40623-016-0559-1, 2016.
- 3) 平成28年熊本地震復興支援ボーリング柱状図緊急公開サイト : <http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/index.html>.
- 4) Shigeki Senna, Atsushi Wakai, Kaoru Jin, Hiroki Azuma, Hiroyuki Fujiwara : Development of cloud-type microtremor observation system, 5th ESG, 2016.
- 5) Ikuo Cho and Shigeki Senna : Constructing a system to explore shallow velocity structures using a miniature microtremor array - Accumulating and utilizing large microtremor datasets - : *Synthesiology*, Vol.9 No.2, pp.86-96, 2016.
- 6) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara, Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78, KS13-KS23, doi:10.1190/geo2012-0248.1, 2013.
- 7) Satoh, T., C. J. Poran, K. Yamagata, and J. A. Rodriguez : Soil profiling by spectral analysis of surface waves, in *Proc. 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. 2, pp. 1429-1434, 1991.
- 8) Pelekis, P. C., and G. A. Athanasopoulos : An overview of surface wave methods and a reliability study of a simplified inversion technique, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 31, 1654-1668, 2011.
- 9) Arai, H., and K. Tokimatsu : S-Wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, pp.53-63, 2004.

キーワード：強震動予測、S波速度構造モデル、微動アレイ、ボーリングデータ、卓越周期

Keywords: Strong motion evaluation, S-wave velocity structure model, Microtremor array, Borehole data, Predominant period