

熊本地震における益城町の地表地震断層の地盤構造探査

Survey of Ground Structure under the Surface Faults in Mashiki Town during the Kumamoto Earthquake

鍬田 泰子 高田 至郎
Yasuko Kuwata Shiro Takada

1. はじめに

2016年4月16日1時25分に熊本県熊本地方を震央とする震源の深さ12km、Mj7.3、Mw7.0の地震（本震）が発生した。その28時間前に発生した4月14日21時26分の地震（前震）とともに、同県益城町では震度7を2度観測したり。益城町の南部には、地震調査委員会が長期評価を行っている布田川断層帯の一部が北東-南西方向に伸びている。本震の地震は南北方向に張力軸を持つ右横ずれ断層型（正断層成分を含む）の内陸地殻内地震であり、益城町のある布田川断層帯の布田川区間を含む約27kmが震源断層と考えられている。本地震により、益城町では地表地震断層が確認され、最大のもので益城町の堂園で水平方向に2.2mの変位が観測されている²⁾。

著者らはこれまでに断層の撓曲帯や地震後の地表地震断層下の地盤構造を表面波探査により評価している^{3),4)}。本地震後には他機関でトレンチ調査が行われていることから、同じ調査場所において表面波探査を実施し、探査精度について分析した。さらに、益城町では断層を横断していた地中埋設管が複数箇所被害を受けている。これらの被害箇所においても表面波探査を実施し、断層上に敷設する管路の設計方法についても分析を行った。

2. 熊本地震の地表地震断層の表面波探査

2. 1 調査場所

熊本地震後では道路や田畑の亀裂などに地表変位を様々な機関が調査している。本研究では、その一つとして、国土地理院から公開されている空中写真判読による亀裂図⁵⁾を用いる。ただし、これらの亀裂には地表地震断層によるものの他、液化化や地盤移動などの成因が異なるものも含まれている。そこで、国土地理院の地表亀裂図とShirahama et al.²⁾による現地測地データを参照する。Shirahama et al.による断層変位測定の調査結果によると、益城町の周辺は布田川断層の南西部に位置し、この地域の断層は、木山低地を沈降させつつ、北側低下の右横ずれである。地表の変位は、堂園で最大2.2mの横ずれが確認されているが、堂園から南西側にある砥川にかけて右横ずれの変位はほぼ収束している。

本研究では、表面波探査の精度を確認するために益城町内で行われたトレンチの周辺の2箇所と、益城町水道課の情報提供により管路を断層が横断したために破断等の被害を受けた3箇所の合計5箇所で表面波探査を行った。図-1には益城町東部の地表亀裂と表面波探査実施場所との位置関係を示す。探査日は、2017年4月14、15日である。探査時には、図中に示す堂園トレンチと下陣トレンチが掘削されている状況にあった。図-2は、Shirahama et al.²⁾によって観測された図-1と同じ場所における地表地震断層の変位である。図-1の①の堂園トレンチで最大2.2m、③、④の下陣で水平方向に30cm近くの変位が観測されるものの、鉛直変位は、堂園を除けば20-30cmで、水平方向が卓越している。

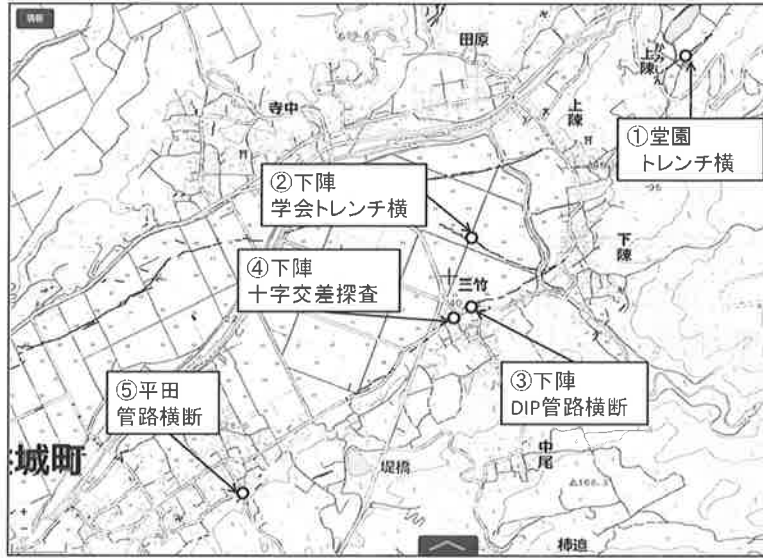
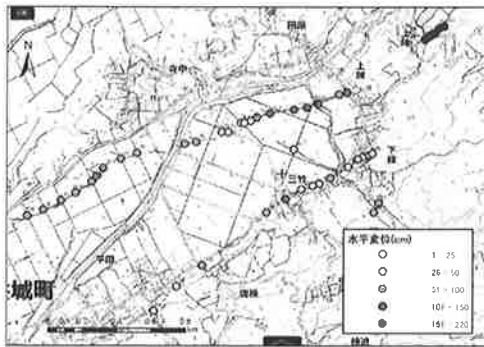
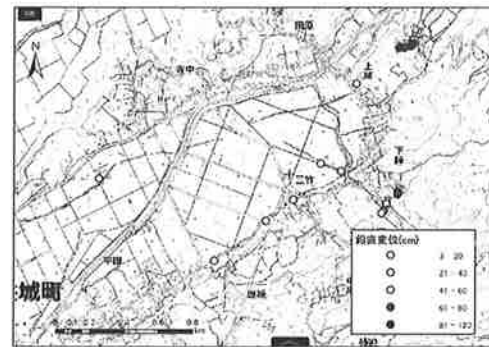


図-1 益城町東部での表面波探査調査場所 (国土地理院 (電子国土 Web) ⁵⁾ に加筆)



(a) 水平変位



(b) 鉛直変位

図-2 表面波探査周辺における地表地震断層の変位 (文献2)のデータに基づく)

2. 2 調査方法

深度 20m までの浅層地盤の S 波速度構造を把握することは、構造物の耐震設計など工学分野において重要である。一般的な地質調査手法としてボーリング孔を用いた PS 検層が行われてきたが、PS 検層は面的な地盤構造の把握に複数のボーリング孔を必要とし、時間、費用がかかるという問題点が挙げられる。これに対して表面波探査は、簡易的、経済的に 2 次元の S 波速度構造を推定する手段として近年用いられている。この探査法は表面波 (レイリー波) の位相速度が主に地盤の S 波速度を反映する性質を利用し、人工的に加振して発生した表面波の位相速度を測定して地盤の S 波速度を推定する手法である。

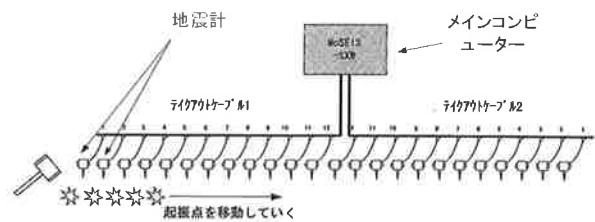


図-3 表面波探査概念図 ⁶⁾

本研究では応用地質(株)の McSEIS-SXW⁶⁾を使用した (図-3 参照)。探査では 24 個の受振器 (ジオフォン) を 1m 間隔で直線上に配置し、隣り合う受振器間の地表面をかけやで起振し、表面波を測定するものである。受振器は、4.5Hz 速度地震計を用いており、100Hz でサンプリングしている。1m 間隔で固定した受振器 24 チャンネルで測線をとる場合は 23m の測線長となるが、受振器をスライドさせることでそれよりも長い測線長も測定可能になる。

本探査の解析方法は以下の通りである。まず、得られた全ての共通起振点ごとに2トレースのクロスコリレーションを計算し、全記録から2トレースの中間点が同じ場所の全てのクロスコリレーションを集め、同じ受振点間隔のものを重合する。次に、同一受振点間隔の記録を受振点間隔に並べることによりその地点固有の位相差を抽出したことになり、これを共通起振点記録として扱う。本解析では擬似共通起振点記録と呼ばれている。また、上記の2トレースの中間位置が同じデータの組み合わせを使用して解析する方法はCMP (Common Mid Point) 解析と呼ばれている⁷⁾。擬似共通起振記録に多チャンネル解析を適用して周波数領域への変換し、受振点間隔に応じた位相をシフトさせて空間方向に積分する。このようにして周波数領域の見かけ速度分布に変換することができ、周波数ごとにその振幅の最も大きくなる位相速度を読み取り位相速度分散曲線が得られる。ここで、交通振動などの低周波数域のノイズや高次モードについて修正を加え、最後に分散曲線をもとに非線形最小二乗法を用いて逆解析を行い、S波速度構造を求める。

本研究では表面波探査を地表地震断層地下の地盤構造へ適用させるが、表面波探査の解析は水平成層構造を仮定するのが一般である。しかし、表面波探査による地盤調査の応用・普及を目的として複雑な地盤への適用性への研究が近年盛んに行われている。林・鈴木⁸⁾は、傾斜二層構造に対して、数値実験により表面波の分散を用いた解析を行い、水平成層構造でない場合も表面波の分散曲線は地盤のS波速度構造を反映することを示している。著者らも、断層運動によって地盤構造が撓曲しているような場所や中国四川の地表地震断層の地盤においても探査を行ってきた³⁾⁴⁾。その結果、レーダー探査で確認できる地下の断層と整合的で、地下における地盤構造が変化している地表面で断層変位が確認されていた⁹⁾。このことから、表面波探査による断層を有する地下構造に一定の評価ができると考えている。しかし、表面波探査は上述した解析手法からも明らかのように、1m間隔で設置した受振器で評価をしているために、水平方向も鉛直方向も1m以下の地盤構造の変化を評価することは出来ない。今回、熊本地震の後に2箇所でもトレンチ調査が行われており、微視的な地盤構造が明らかになっているものに対して、同じ場所で表面波探査を実施し、その有効性を確認する。

3. 探査結果

3. 1 堂園トレンチ横

堂園トレンチ調査は、熊本大学と広島大学らの合同調査の下で進められており、熊原ら¹⁰⁾によって速報されている。トレンチの場所は、水平変位2.2mが生じた地点のすぐ近傍の休耕地である。表面波探査はトレンチ近傍で測線を設置した(図-4参照)。北東-南西方向の地表地震断層に対して、長さ10m、幅7m、深さ3mのトレンチが掘削された(図-5)。これに対して表面波探査の測線はL=0mの方向がN10W、L=23mの方向がS10Eであり、断層と表面波探査の測線とはL=15mで交差している。図-6は表面波探査による測線断面のS波速度構造を示している。GL-1.5mまでは $V_s=130\text{m/s}$ で、GL-4mまでは水平成層構造を確認することができる。GL-4m以深では、北側の硬い地盤が隆起していることが確認できる。熊原らのトレンチ調査の解説によると¹⁰⁾、トレンチ壁面には、上位から地表から耕作土層(I層)、磁器片を含む、明灰色粘土~シルト層(II層)、灰褐色小礫~砂質シルト層(III層)、暗灰褐色腐植質層(IV層)、円礫混じり明褐色ローム層(V層)、巨礫を含む円礫層(VI層)が認められた。IV層とV層の境界は凹凸があることから不整合と見られる。またV層中には鬼界アカホヤテフラの塊が認められた。

トレンチの東壁面は、陥没構造に直交する断面で、正断層性ネガティブ・フラワー構造が確認されている。陥没構造の両縁を限る断層は、地表近くでは45度程度の低角になるが、地表下2mでは垂直に近く、右横ずれ変位が卓越した地震断層の変位様式を反映している。断層の変位量は、I層とIV層の見かけ上の上下変位量は共に約20cmであるが、IV層下部が北側の断層と分岐する断層の間で約40cm下方に引きずられている。また、V層は断層を挟んで下位のVI層と断層を境に接しており、VI層のその変位量は今回の変位量より大きいと考えられる。さらに、今回の地震の一つ前の断層変位はIV層下部堆積後に生じたとみなせ、アカホヤ降下以降熊本地震を含めて少なくとも2回の断層変位があったと推定している。

熊原らの示すアカホヤ火山灰を含むV層はGL-2mの地層であり、 $V_s=200\text{m/s}$ 相当である。幅2mのポジティブフラワー構造において断層面で40cmの隆起をトレンチでは確認されているが、表面波探査では深さ方向に1m間隔での速度推定をしているために、トレンチ調査で確認された隆起は評価できていない。熊原らはアカホヤ火山以降に2回の断層

変位があったと推定しているが、表面波探査による GL-4m 以深の地盤の隆起以降に表層地盤が堆積したと考えれば、アカホヤ火山の噴火があった約 7,300 年前よりも古い年代に大きな活動があったと考えられる。ただし、トレンチ調査では GL-3m 以深の調査は行えておらず、確認はできない。

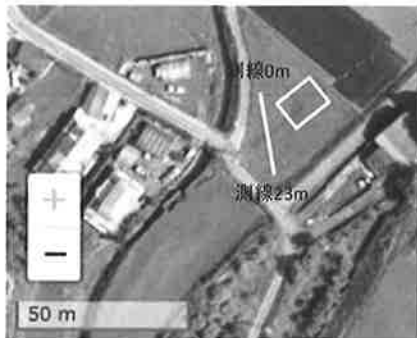


図-4 堂園トレンチと表面波探査との位置関係 (国土地理院 (電子国土 Web) ⁵⁾ に加筆)



図-5 堂園トレンチの様子

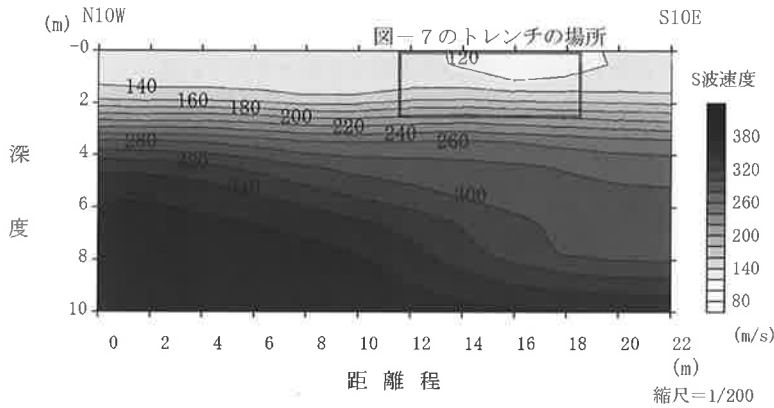


図-6 堂園トレンチにおける S 波速度構造

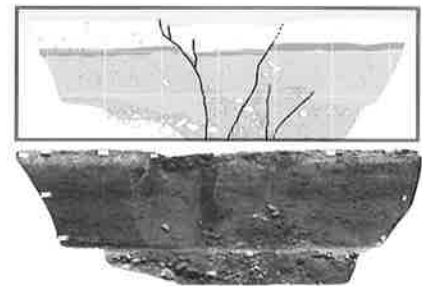


図-7 堂園トレンチ調査による地盤構造¹⁾

3. 2 下陣 学会トレンチ横

堂園から南西方向に走行する布田川断層から北西方向に分岐している左横ずれしている地表地震断層で、土木学会原子力土木委員会 断層活動性評価の高度化小委員会のトレンチ (以下、学会トレンチと呼ぶ) が掘削されている。図-8 に学会トレンチと表面波探査の測線の位置関係を示す。トレンチ調査は長さ 20m、幅 6m、深さ 2m のトレンチが 2 本ある。Shirahama et al.²⁾によると、この周辺の水平方向の変位は 0.30m で、鉛直方向の変位は確認されていない。表面波探査の測線 L=3m で道路横の水路に現れた断層と横断している。図-9 は L=0m の方向からみた表面波探査の様子であり、手前に水路の補修痕がみえる。図-10 は L=23m の方向からトレンチと測線を見た様子である。

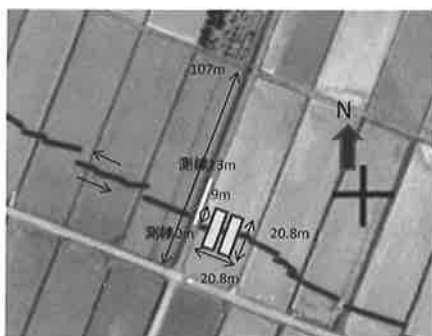


図-8 学会トレンチと表面波探査との位置関係



図-9 調査場所周辺の水路に生じた変位



図-10 学会トレンチを含む調査地の様子

トレンチ調査の結果を報告している上田ら¹²⁾によると、礫層や砂層などを変位させる高角度の断層があったことが報告されている。断層の切断、被覆断面から、少なくとも2回の地震があったことが確認されている。それぞれ、9,400-4,500年前と、14600-14100年前と推定されている。さらに、右横ずれ主体の布田川断層帯の活動間隔よりも長く、右横ずれ断層帯の活動に伴ってできる歪みを解消するために変位した断層と示唆している。

図-11は学会トレンチ横の測線のS波速度構造を示している。L=2mからL=6mの表層近くに $V_s=200\text{m/s}$ の柔らかい層があるが、GL-2m以深では $V_s=300\text{m/s}$ 以上の水平成層構造が確認でき、地下深いところで地層が隆起していることはない。実際に、地表には水平方向の断層変位はあったものの、鉛直方向の変位はこの場所では確認できなかった。土木学会においても2本のトレンチ調査の後、さらに深いトレンチを掘削されている。

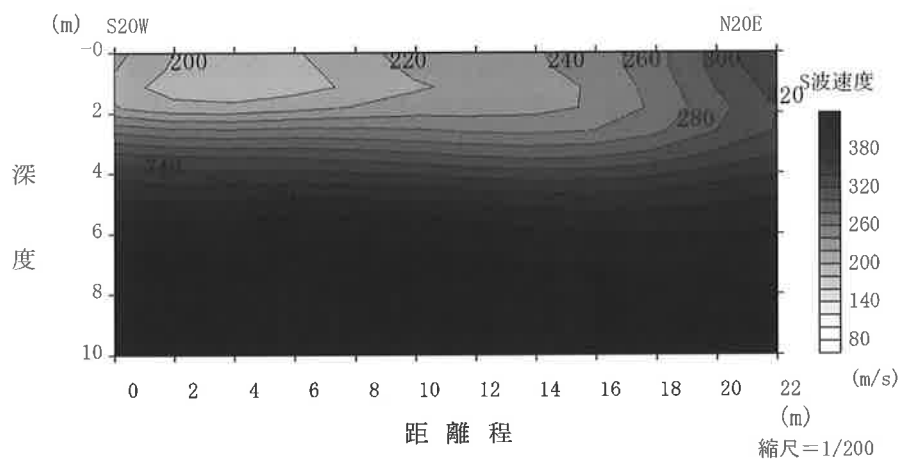


図-11 学会トレンチ横でのS波速度構造

3.3 下陣 DIP 管路横断場所

下陣地区で道路下に埋設されていた配水管 (DIP $\phi 100$) が断層を横断して、漏水被害が生じた。図-12に地震断層の位置と表面波探査の測線の位置関係を示す。北東-南西方向に走行する断層は、図の右上の水田から道路を横断し、さらに左下の住宅の下を横断している。表面波探査は東西方向に測線を設定した。L=15mで断層と交差している。Shirahama et al¹²⁾によると、水平方向の変位は0.50mで、鉛直方向の変位は確認されていない。断層を横断している管路は交差箇所の両側の管路がそれぞれ変形し、それらの間の継手で漏水した。図-13は掘り起こされた2本の管路を示している¹³⁾。図-14は現地の様子で、L=23mの場所から測線を見ている。

図-15は表面波探査による測線断面のS波速度構造を示している。GL-2mまでの $V_s=180\text{m/s}$ の表層地盤は成層構造をなしているが、それ以深ではL=22mの方がL=0mよりも1m程度隆起している。また、測線L=10mからL=16mまで低角で隆起している地盤の肩がGL-2mからGL-10mまでの深さ方向に並んでいる。L=22m側の隆起は、断層よりも北

側で隆起していることになる。今回の地震では、地表面で鉛直変位は観測されなかったが、過去の地震で活動している場合には、北側が 1m 程度隆起するような傾向が見られた。

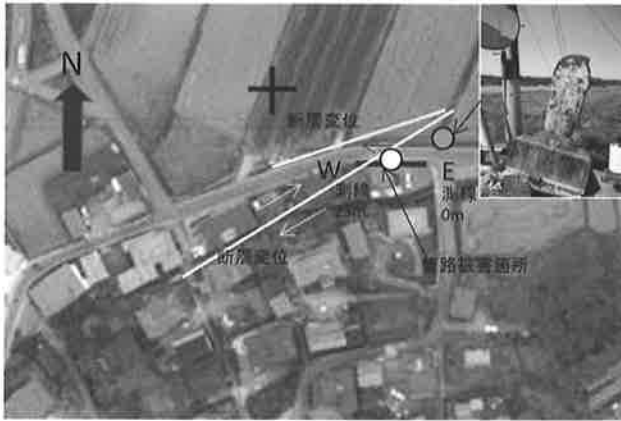


図-1 2 下陣管路横断周辺の表面波探査場所
(国土地理院 (電子国土 Web) ⁵⁾ に加筆)



図-1 3 断層横断箇所では掘り起こされた DIP 管¹⁴⁾



図-1 4 下陣の管路横断周辺の調査地域の様子

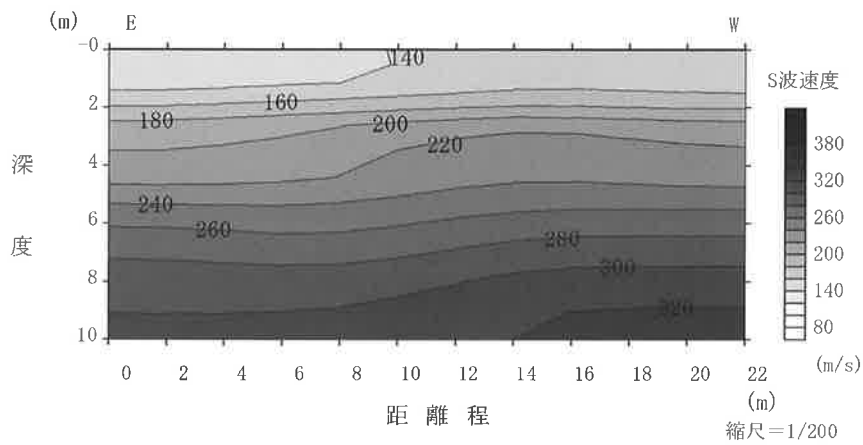


図-1 5 下陣の管路横断周辺での S 波速度構造

3. 4 下陣 水路横断箇所

下陣の水路横断箇所は、3. 3で示した DIP 管路横断箇所から 100m ほど西の場所にあたる。DIP 管路を横断し、住宅の背後にある水路に沿って断層変位が続いている。断層変位は水路に沿って変位しているが、表面波探査は断層に横断する方向と断層に平行する方向の 2 測線を図-1 6 に示すように設定した。水路より南側に向かって測線は緩やかな斜面になり、標高が高くなる。水路と道路との交差部にある暗渠で明瞭な断層変位が確認できた。図-1 7 に示すように水平方向には 1.2m の右横ずれが生じ、鉛直方向には北側が 0.3m 下がっていた。暗渠内に貫通している水道鋼管は断層面で破損していた。



図-16 下陣水路横断箇所での表面波探査調査場所 (国土地理院 (電子国土 Web) ⁵⁾ に加筆)



図-17 水路横断部での断層変位

図-18に水路横断方向の測線のS波速度構造を、図-19に水路平行方向の測線のS波速度構造を示す。両測線は交差していないが、水路平行方向の測線の延長上に横断方向のL=12mがある。横断方向のS波速度構造をみると、表層からL=22mに向けてS波が速い層が浅いところに現れている。L=22mに行くにつれて山手方向に地形が変わるため、S波の速い層が見えている。図-15では断層より北側で基盤が隆起する傾向がみられていたが、水路横断部では深い構造での隆起よりも地形による地層構造が強く表れる結果になった。一方、水路平行方向の測線では、元々宅地があり、地震の被害によって更地になっているそのため、表層地盤が掘削等によって改変されている。しかし、 $V_s=160\text{m/s}$ 、 180m/s の速度の等深線でみれば横断方向のL=12mの位置と同じような構造をしていることが確認できる。水路平行方向の測線では、GL-10mで測線端部が測線中央よりもS波速度が遅くなる傾向が見られるが、測線端部は推定精度が下がることを考慮すれば、ほぼ水平成層構造をなしているといえる。

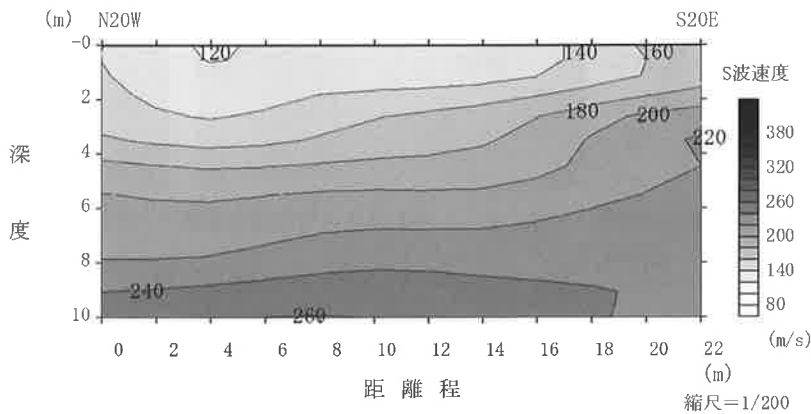


図-18 下陣の水路横断方向のS波速度構造

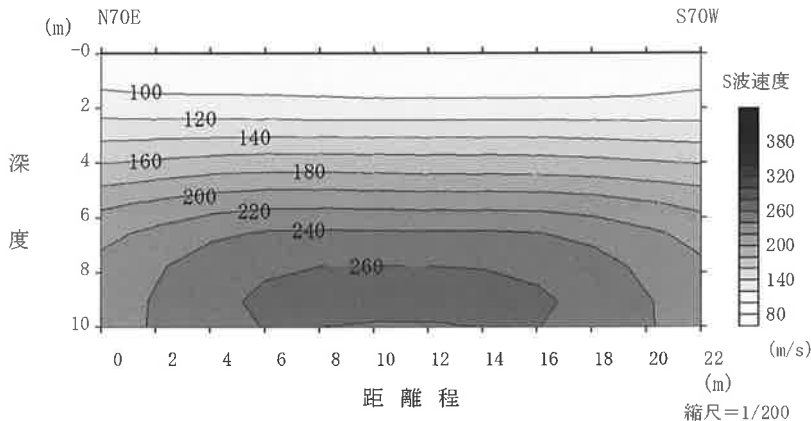


図-19 下陣の水路平行方向のS波速度構造

3. 5 平田 DIP 管路横断場所

平田地区での断層変位と表面波探査の場所を図-20に示す。平田地区では、2路線あったダクタイル鑄鉄管 K 形 φ 150 と K 形 φ 200 が断層を横断して、管軸方向に 0.2m 開き、管軸直角方向に 0.35m 右横ずれの変位を受けて被害が生じた¹³⁾。2本の管路は図-21に示す側溝に沿って道路側に埋設されていた。側溝も 2.5m の長さにおいて、0.4m の軸直角方向の変位が生じた。これらの管路変位の場所よりも南側にも図-22に示す大きな横ずれの断層変位が生じた。Shirahama et al²⁾によると、水平方向の変位は 0.46m で、鉛直方向の変位は確認されていない。

表面波探査の結果を図-23に示す。測線は管路横断場所よりも南側にある。断層変位のあった測線の中央付近では、GL-5m 以深で測線の左右で 3m 近くの層構造に段差があり、南側が隆起している。地下に段差構造がある上部で、今回の地震で水平変位が生じた。また、地表の断層面では地震後に道路舗装が復旧されており、舗装された範囲の表層の S 波速度がやや速くなっている。



図-20 平田地区の表面波探査調査場所
(国土地理院(電子国土Web)⁵⁾に加筆)



図-21 平田地区の管路被害場所



図-22 平田地区の断層変位

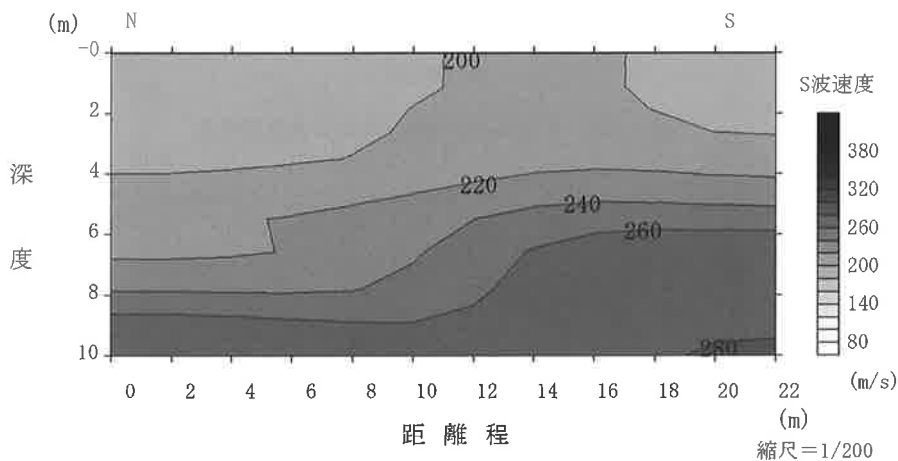


図-23 平田地区の S 波速度構造

4. 考察

益城町の5箇所の地表地震断層が現れた周辺において表面波探査を実施した。北東-南西方向に走行する布田川断層と直交方向の測線では、堂園と下陣では、GL-2、3mまでの表層地盤の下層で地表の断層の直下に1~2m近くの隆起を確認した。これらでは、いずれも断層よりも北側が隆起する傾向にあった。一方、それよりも南西側の平田では山手となる南側で2m程度の隆起があった。本地震の表層では南側が一様に隆起しているが、深い構造では異なっていた。また、下陣のトレンチのように、地下の地盤構造では断層の前後で隆起が確認できないものもあった。トレンチ調査では、2~3mの深さの表層地盤を確認されるが、表面波探査で得られた隆起はトレンチ調査の深さよりも深い地盤構造で断層活動と考えられる変位であった。

トレンチとの結果を比較すると、沖積層と洪積層の層境界の目安としてアカホヤ火山灰が参考にされるが、堂園トレンチではアカホヤ火山灰が含まれるGL-2.5mの地層では $V_s=220\text{m/s}$ 程度であり、工学的基盤層ではやや遅めのS波速度であった。その他の調査場所では、GL-2~4mより下層で地盤の隆起が確認できるが、表層の地層はほぼ水平であった。それらの表層地盤は100m/sから200m/sに分布していた。

管路が断層を横断したために、その断層変位によって被害を受けた管路があるが、GL-1m程度の管路位置では地表地震断層横断の前後で地盤構造が水平方向に変化していることはなかった。アカホヤ火山以降2回の地震があったことが推定されているが、アカホヤ火山後に堆積した地層に管路が埋設されており、断層前後で管路の耐震計算に用いる地盤剛性を変えるようなことはないと考えられる。断層による地盤隆起によって生じた基盤層の不整形面を通して上昇してくる入射波については、本地震の段差が2m程度であったことからすると基盤層の隆起の前後で位相差が生じる。ただし、S波速度が200m/sから300m/sの地層での変化であるため、今回の断層探査地域においては断層直下から一様な入射波があったとしても基盤層の不整形性によって断層境界で大きな歪みが卓越するとは考えにくい。それよりも、断層近傍の地震動特性が支配的な要因になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 気象庁：平成28年（2016年）熊本地震の関連情報（URL：http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html）（閲覧：2018年9月）
- 2) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y. et al.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68:191, 2016
- 3) 高田至郎, 鉦田泰子, 新谷正樹：アゼルバイジャン・バクー市における地震発生と地震動評価、建設工学研究所論文報告集,第48号, pp65-78, 2006
- 4) 鉦田泰子, 齊藤栄, 武市淳, 宮田隆夫, 洪景鵬, 付小方, 侯立玮：地表断層近傍の表面波探査による地盤構造 — 中国汶川地震の事例 —, 建設工学研究所論文報告集,第51号, pp.117-130,2009
- 5) 国土地理院：数値地図（国土基本情報）オンライン(SHP), 2017
- 6) 応用地質株式会社：高精度表面波探査マニュアル, 2004
- 7) 林宏一：表面波探査におけるCMP解析, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 105, pp. 13-16, 2001
- 8) 林宏一, 鈴木晴彦：二次元構造における表面波の伝播とその分散曲線, 物理探査学会学術講演会論文集, 103, pp.226-230, 2000
- 9) Miyata, T., Hong, J.P. and Fu, X.F., Ground-penetrating radar imagery of the co-seismic rupture in Wenchuan Earthquake, Sichuan, China, AOGS2009, CD-Rom, 2009
- 10) 熊原康博, 鳥井真之, 中田高, 後藤秀昭, 岩佐佳哉, 鈴木康弘, 渡辺満久, 遠田晋次, 高橋直也, 奥野充：益城町堂園及び南阿蘇村河陽のトレンチ掘削調査に基づく布田川一日奈久断層帯北東部の活動履歴（予報）、日本活断層学会秋季学術大会、2017
- 11) 熊原康博：堂園トレンチの断面図（私信）、2018

- 12) 上田圭一, 宮脇理一郎, 家村克敏, 横山俊高, 宮脇明子 : 2016 年熊本地震時に出現した 2 系統の地表地震断層群の活動履歴: 益城町寺迫および下陳におけるトレンチ調査結果 (序報), 一般社団法人日本地質学会 第 124 年 学術大会 (2017 愛媛), 2017
- 13) 益城町水道課: 管路被害の写真 (私信), 2018
- 14) 厚生労働省: 平成 28 年(2016 年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書, 2016

著 者

鍛田 泰子 研究員, 博士 (工学), 地震工学
高田 至郎 所員, 工学博士, 地震工学