

【建設工学研究所論文報告集第 61 号〔報告〕2019 年 11 月】

2016 年熊本地震・益城町地域での表面波探査と 被災メカニズムの検討

Surface Wave Exploration Tests and Investigation on Damage Mechanism at Mashiki -Town During 2016 Kumamoto Earthquake

高 田 至 郎 Takada Shiro	鍬 田 泰 子 Kuwata Yasuko	武 田 康 夫 Takeda Yasuo
東 俊 司 Higashi Shunji	田 口 由 明 Taguchi Yoshiaki	北 川 英 二 Kitagawa Eiji

1. はじめに

2016 年熊本地震では布田川断層・木山断層近傍の住家・インフラ施設に多大の被害が発生した。また、地表に断層変位が出現して、家屋倒壊による人的被害も発生している。著者らは震源近傍の地表断層亀裂を横断する諸施設に、多大の破壊が見られたので、そのメカニズムを検討するために表面波探査による地盤 S 波速度推定を実施した¹⁾。更に、表面波探査結果と、他研究者・研究機関によるトレンチ調査などと比較している²⁾。

2. 表面波探査法と測定位置

表面波探査法はインパルス振源によって励起された表面波を測線上の多数の受振器を用いて波形測定を行い、それらのトレースから位相速度曲線（分散曲線）を計算し、さらに一次元の測定解析を測線上で連続して行うことにより二次元の S 波速度構造を求める手法であり、測定には応用地質(株)製の機器を用い、原則的に、測線 46m で 2m ごとに地震計を配置して速度分散曲線を



図-2.1 表面波探査地点（益城町）

求めて地下構造を決定し、S 波速度構造を得た。測線長の約半分までの地盤深さ構造を推定することができる¹⁾。本論文で報告する 9 地点を含めて、これまでに表面波探査を行った益城町の地点を図-2.1 に示している。谷川断層 2 地点、下陣地域 2 地点、木山断層地域 2 地点、秋津川岸 1 地点、浄化センター 4 地点である。

2017 年の地震発生直後に実施した断層横断管路の被害地点である下陣および平田の 2 地点での測定で得られた地盤構造を図-2.2、図-2.3 に示している。下陣では、地表面付近は約 150m/sec で、地下 10m 付近では約 300m/sec の傾斜した岩盤層相当速度値が見られる。岩盤層の傾斜角度は約 60 度であり、断層モデル³⁾で想定されている角度と対応している。また、図-2.3 には、平田での S 波速度構造を示した。本地点では地表面付近は約 200m/sec のやや硬地盤で、地下 10m 付近では 250m/sec 以上の岩盤相当の速度である。また、その傾斜角は下陣と同様である。

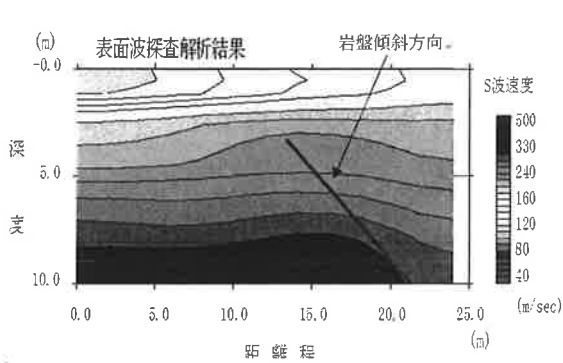


図-2.2 下陣探査結果 S波速度分布

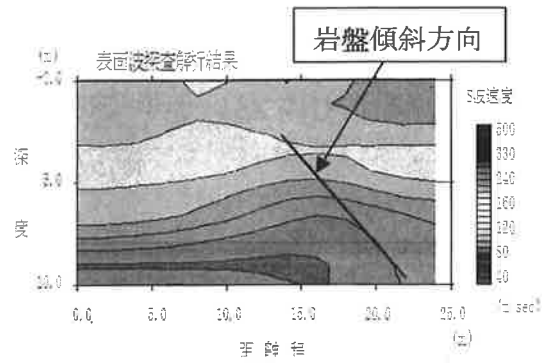


図-2.3 平田探査結果 S波速度分布

3. 表面波探査結果と地盤・被害特性

第2次調査（平成30年11月7～8日）で表面波探査で実施した地点は図-3.1に示す9地点である。



図-3.1 2018年11月に実施した表面波探査位置

3.1 益城下水道浄化センター

益城浄化センターでは2016年熊本地震によって、汚泥処理棟の基礎杭が損傷し建屋が傾斜した。また、反応タンク躯体継手が破損し漏水したことにより汚泥処理棟、浄化センターポンプ室の地下部機器が水没した。さらに、最初沈殿池、最終沈殿池のフライト板破損・搔寄せ機チェーン脱輪などにより、浄化センターの水処理機能が低下、汚泥処理機能は全て使用不可能となった。このため移動脱水機などの導入により緊急対応が実施された。建屋の傾斜は図-3.2(a)～図-3.2(b)に示すように建屋周辺の液状化によって、建屋支持杭が座屈して傾斜したものである⁴⁾。最大沈下量は0.135mで、傾斜は東方向1/176、北方向1/107であった。腐食土層を切削した後、高圧噴射攪拌工で地上からセメント改造体を築造している。築造工は既設杭Φ700mmの周辺に、地上からΦ5000mm x 14mの杭を9本設置して傾斜を修繕した後、器機類の修繕を実施した。浄化センター内の建屋配置は図-3.3に示すとおりで、図の測線L1、L3の交差する建物である。



図-3.2(a) 基礎杭の破壊

図-3.4(a)～図-3.4(b)、図-3.5(a)～図-3.5(b)は、破断杭周辺のボーリング資料およびセメント改造体掘削の詳細である。地表面から約1.8mまで基礎部分があり、その下部に杭と基礎の接合部が約0.5m、さらに修理杭が約2.3mで杭部分はセメントを注入して固めている。したがって、地上から約5mは固い地層となっている。一方、図-3.4から知られるように、従来のボーリングデータから約16mの深さは硬い地層で構成されている。表面波探査結果によれば地上から数mではS波速度280m/secで固く、いったん速度が低下し、16m以降、かなり硬い数百m/secのS波速度となる。L1測線地下には洞道があり、破壊杭の改良工事の影響が表面波探査に現れていると考えられる(図-3.6)。したがって、従来のボーリングによるデータを勘案すると、地震前にはかなり軟弱な地層上に建屋があり、建物、地盤の相対運動などにより、杭傾斜や杭頭破壊が生じたと考えられる。



図-3.2(b) 杭頭破壊



図-3.3 浄化センター敷地内の表面波探査2測線

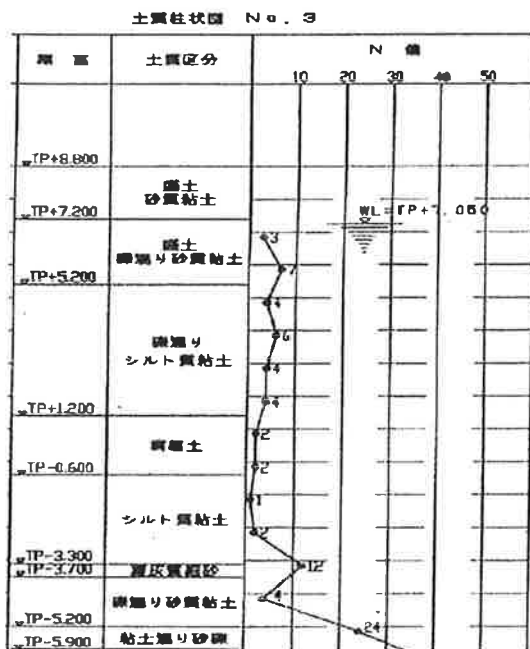


図-3.4(a) 測線近傍のボーリングデータ (地表～地下3m)

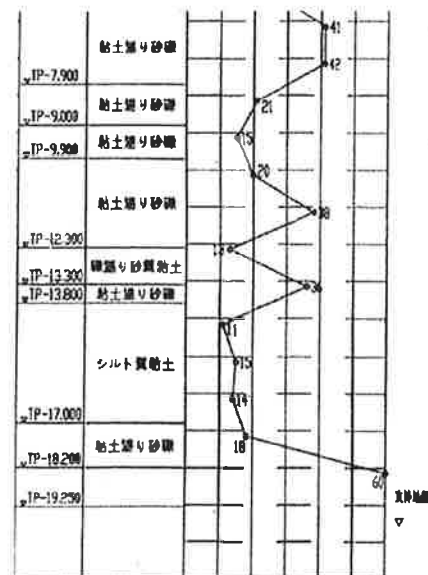


図-3.4(b) 測線近傍のボーリングデータ (地下3m～10m)

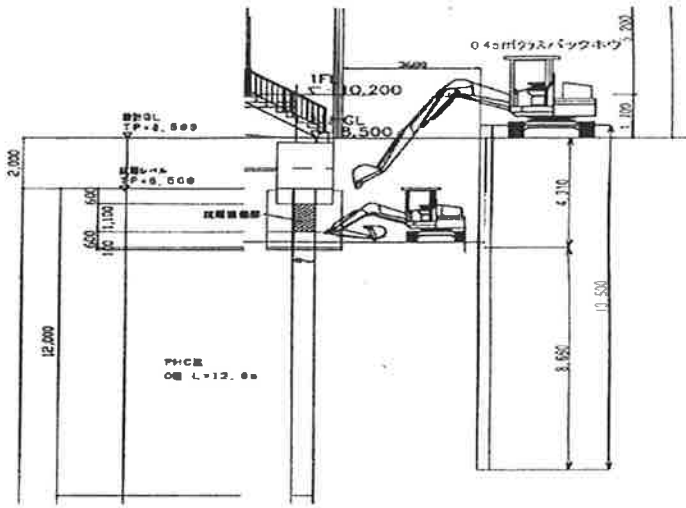


図-3.5(a) 地下掘削と基礎杭の長さ (地表～地下12m)

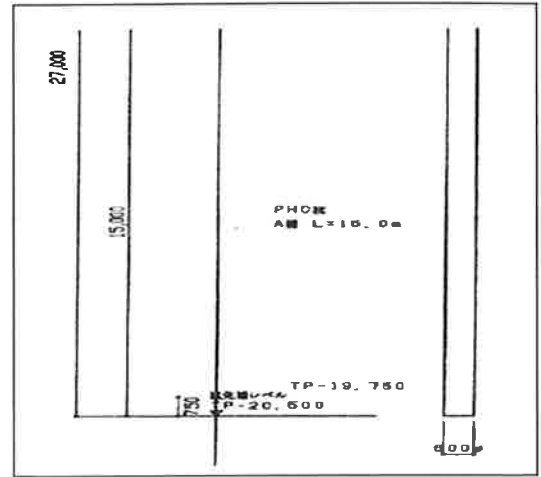


図-3.5 (b) 基礎杭の先端部分

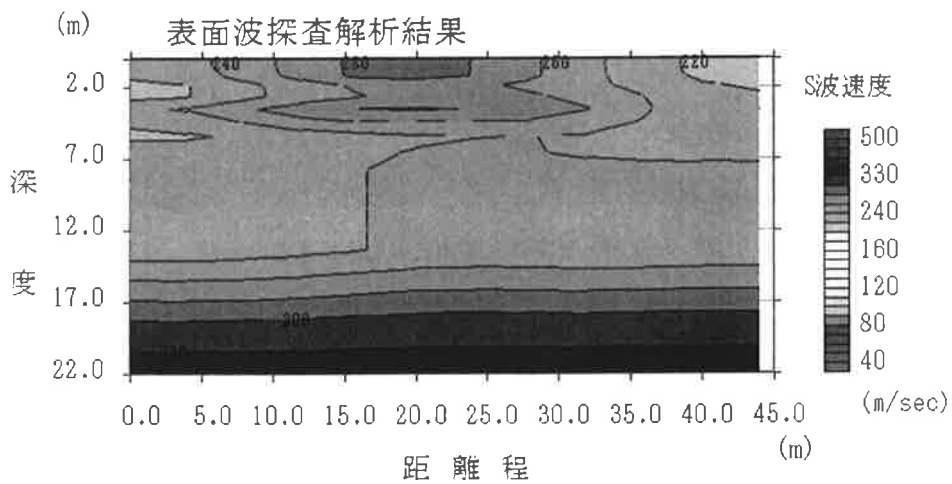


図-3.6 表面波探査結果、L1 測線の地下 S 波速度分布

図-3.7、図-3.8に、同じ浄化センター内の、L2、L3 測線での表面波探査結果を示す。L2 は、建屋から 5m 程度離れた測線で、地表部の S 波速度は小さく、地中 20m 付近まで 250m/sec 程度である。とくに地下洞道の影響もない。また、L3 では 150～200m/sec の S 波速度である。上記より、浄化センター内 3 測線では、とくに側線 L1 で見られた S 波が極端に小さくはなく、シルト質粘土、あるいは粘土層が多く、砂質地盤で著しい液状化現象で杭頭が破壊したと推定するよりも、建屋と周辺軟弱地盤の震動の相対運動により、建屋杭の破壊が生じたものと考えられる。

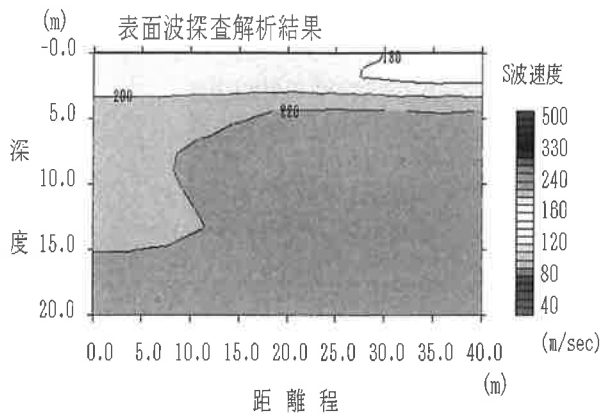


図-3.7 L2 測線の地下 S 波構造

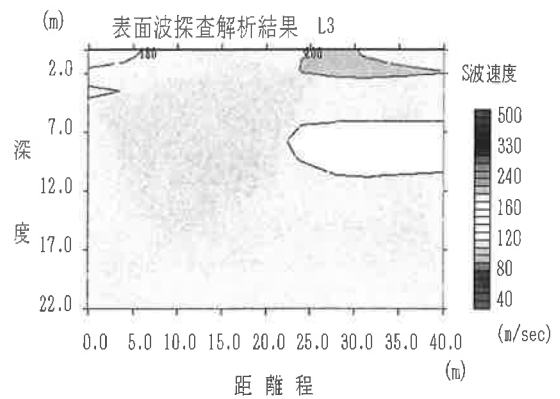


図-3.8 L3 測線の地下 S 波構造

3.2 浄化センター前道路のマンホール浮上

図-3.9 は、1 度目の震度 7 (左側上下図) および 2 度目の震度 7 (右側上下図) 後の道路とマンホールの被災状況である。本道路は浄化センター入口門前の位置にある。1 度目は道路面の不陸が生じている程度であるが、2 度目の震度 7 では、マンホールの浮上 (または周辺地盤の沈下)、道路陥没がみられる。本道路下には、下水道流入管 (Φ1000、HP 管) と処理水流出管 (Φ800、FRPM 管) が埋設されていた。HP は地震時に被害があり、FRPM 管は無被害で、敷設替え工事を実施している (益城町下水道部局のヒヤリング)。そこで地震後、管内カメラで両管の破損状況を調査した画像を入手したが、管路継ぎ手付近で少量のずれ、亀裂や離脱がみられるが、マンホール部での損傷、離脱は見られない。マンホールの路面突出は、周辺地盤の沈下によるものと考えられる。路面被害の著しい位置 (図-3.10) で、表面波探査を実施した。結果を図-3.11 に示す。120~140m/sec 程度の S 波速度である。また、路面変状表層付近の土質は、数 10cm が黒色の火山灰土質で、以深は粘土層で軟弱な土層である (図-3.12, 図-3.13 参照)。液状化が激しかったとは推測できない。2 度目の強震動により、道路沈下が促進されたと考えられる。流入・流出管路ともマンホール突出部は切管補修されたが、敷設替えは行われていない。

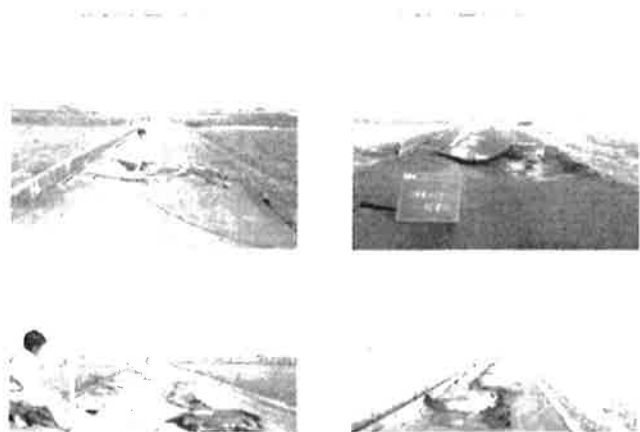


図-3.9 2 度の震度 7 後の管路埋設道路路面

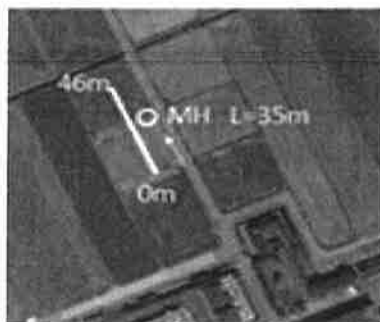


図-3.10 浄化センター前道路測線

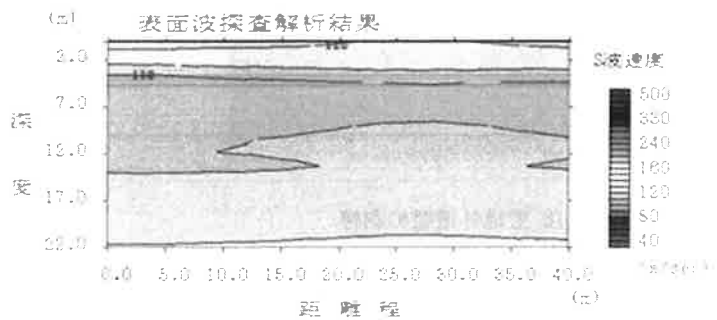


図-3.11 浄化センター前道路の地下 S 波構造

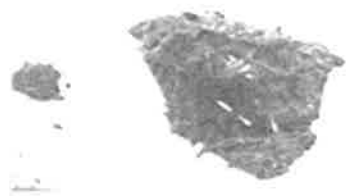


図-3.12 火山灰土層



図-3.13 表土火山灰と粘土層

3.3 谷川断層

谷川断層は平成 29 年 11 月に天然記念物に指定された。谷川断層の住家敷地には母屋・納屋があり（図-3.14）、断層は図-3.15 に示すよう共役断層となっている。圧縮力により、45 度方向にずれを生じる断層である。母屋・納屋の被災状況を図-3.14 に示している。本図は、(株)有明測量開発者の島浦⁵⁾が文化財保護のために 3 次元スキャナーで作成したものである。



図-3.14 母屋と納屋⁵⁾



図 3-15 共役断層による亀裂



図-3.16 敷地外道路の測線

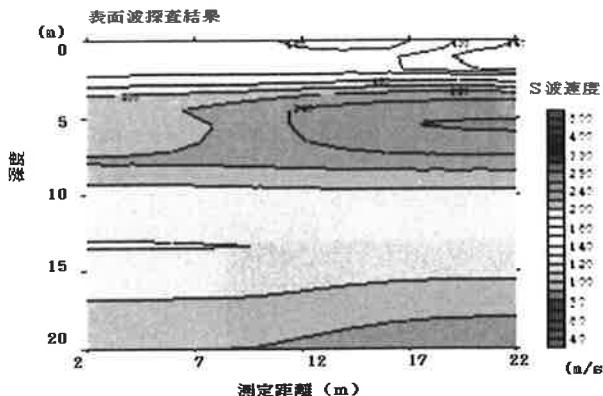


図-3.17 谷川断層 地下 S 波構造

著者らのグループは敷地内外の通路測線で表面波探査を実施した(図-3.16)。図-3.17 に見るように北落ち傾斜地層で段差地点は母屋前 6.5m で観測された 70cm 段差と対応している。天然記念物となった谷川断層は布田川断層の派生共役断層で、母屋・納屋に損壊をもたらしたものと推察される。

3.4 家屋倒壊が集中した木山断層地域

熊本地震後、国土地理院によって木山断層について詳細な調査が行われた。その結果、図-3-18 に示すように、木山断層は布田川断層と約 30 度の傾きをもつ派生断層で、益城町市街地地下に不陸構造を持っているが、今回の地震により活発な活動をしたとは考えられていない⁶⁾。しかし、地下の不陸基盤構造は、震動地盤増幅により地表の建物を多大の影響を与えたと考えられる⁷⁾。

図-3.19 と図-20 には益城町市街地の地下構造と断層を示している。調査では活断層が A~C の階段状の 3 地点で不陸地下構造が存在し、木山断層帯と称している。布田川断層の過去の動きに対応して派生的に生じた断層である。図-3.20 に示されるように、今回の熊本地震では断層動きは A が顕著であるが、B と C は特に断層としての動きはなかったことが指摘されている⁶⁾。

木山断層西縁付近では家屋被害が集中した。秋津川の北部地域である。建築学会の調査⁸⁾による家屋被害率と地盤特性の関連が示されている。図-3.21 に家屋被害率と常時微動 H/V による地盤卓越周期の関係を示している⁸⁾。また、図-3.22 は地質と微動卓越周期の関係を示したものである。家屋倒壊の集中地域は、国道 28 号線の南側および秋津川北側沿いである。図-3.21 および図-3.22 に推定されている家屋被害集中地域の図中に木山断層線を加筆している。本地区で 2 測線を設けて表面波探査を実施した。図-3.23~図-3.26 に測線位置と得られた S 波速度構造を示している。両測線とも地表下数 m までは 100m/sec の極めて小さい S 波速度で、軟弱な地盤である。常時微動による卓越振動数が 1.0HZ 以下の地域で倒壊率が 50%以上となっており、地下基盤構造の不整形と地震動増幅が建物被害に多大の影響を及ぼしていると判断される。

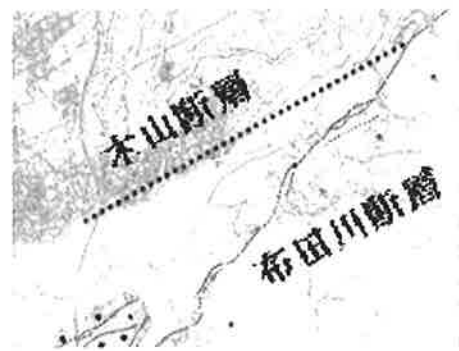


図-3.18 木山断層と布田川断層⁶⁾

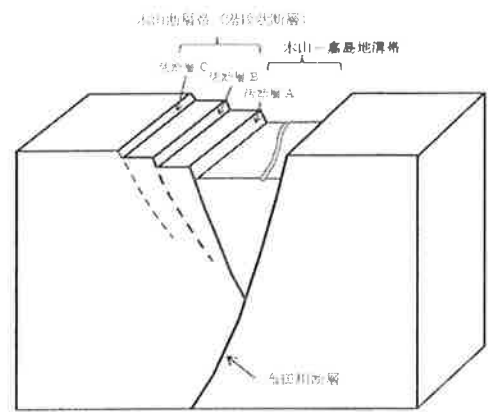


図 3.19 布田川断層と木山断層⁶⁾

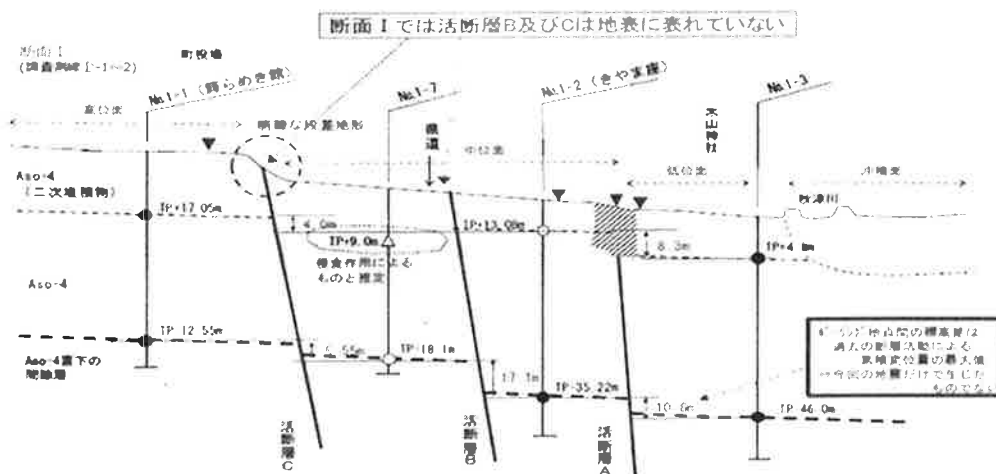


図-3.20 木山断層の地下構造⁶⁾

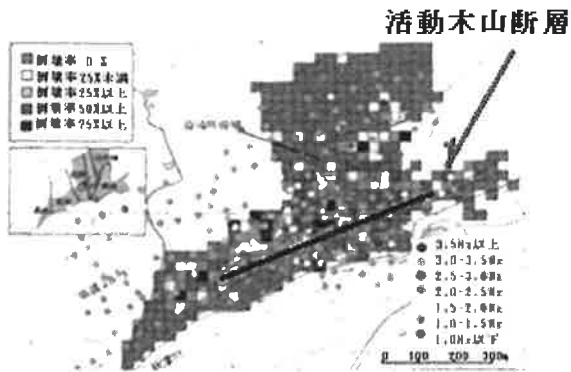


図-3.21 建物倒壊率と常時微動⁸⁾

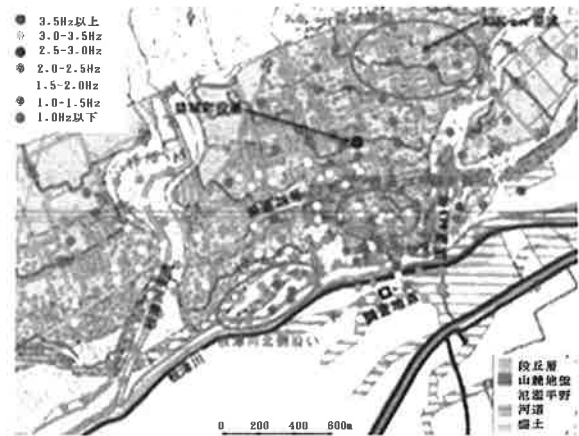


図-3.22 地質と常時微動⁹⁾

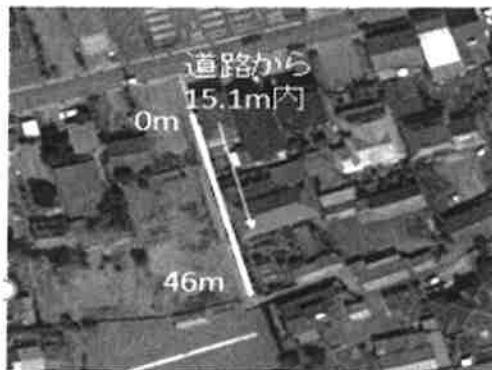


図-3.23 南北測線 46m

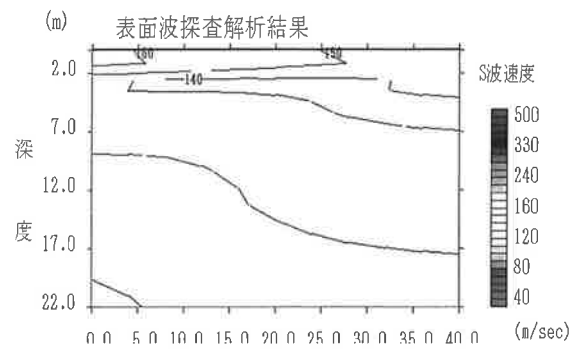


図-3.24 南北測線 S波速度構造



図-3.25 東西測線 23m

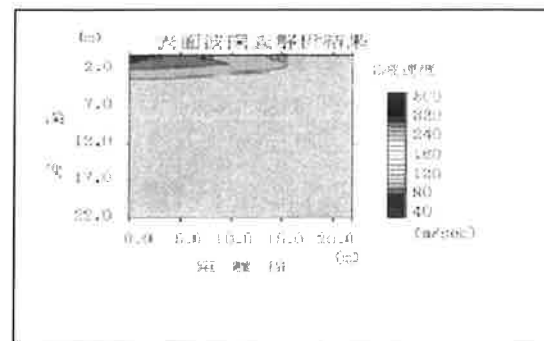


図-3.26 東西測線 S波速度構造

3.5 秋津川液状化地域

秋津川河岸の地質については、下水道工事の際のボーリングデータを図-3.27 に示している¹⁰⁾。今回の表面波探査を実施した測線よりも若干、西側の位置である。秋津川堤防は大きく沈下し、地震復旧工事として河川堤防改修が大規模に行われている。ボーリング調査結果では地表面下数 m まで N 値は 10 以下であるが、図-3.28～図-3.29 に示すように、46m 測線による表面波探査では、地表面下 20m 近くでも S 波速度は 100m/sec 以下であり、きわめて軟弱な地盤が見られ、堤防の沈下は軟弱地盤が影響していると推定される。

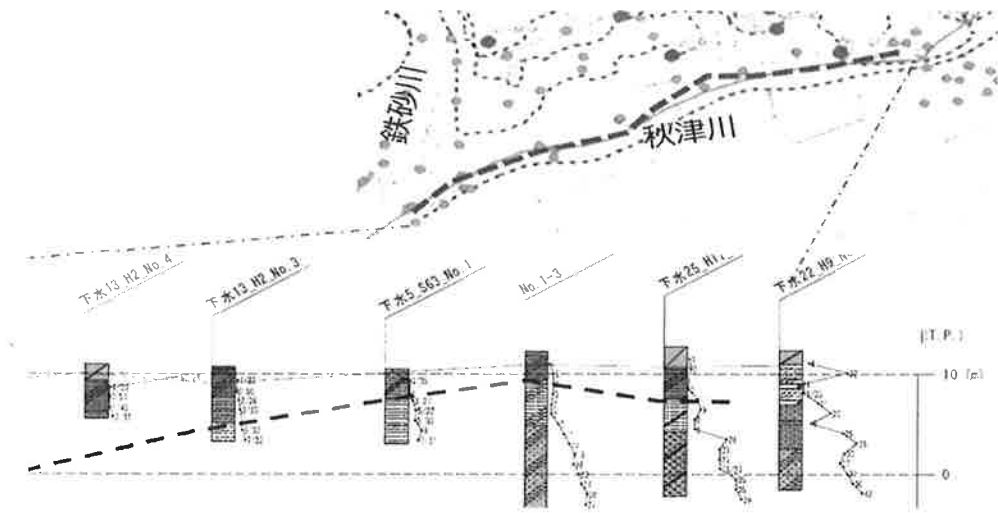


図-3.27 秋津川沿岸のボーリング調査結果（下水道工事）¹⁰⁾

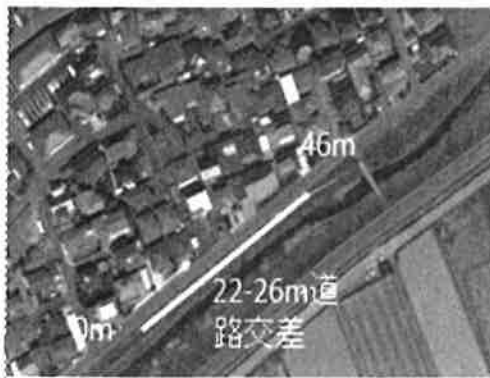


図-3.28 秋津川測線

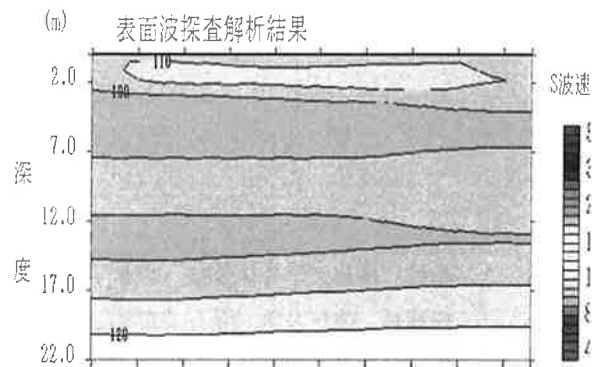


図-3.29 秋津川測線 S 波構造

まとめ

- ① 益城町における被災地点9箇所では表面波探査を実施して地下の2次元S波速度構造を推定した。
- ② 益城浄化センターの施設の基礎杭が破損した被災要因は、液状化流動力に起因するものでなく、上部構造と軟弱地盤内の下部構造の揺れの相違によるものと推定される。
- ③ 浄化センター前の農道内埋設のマンホールの見かけ上の浮上は、周辺道路の沈下によるものである。
- ④ 天然記念物に指定された谷川断層（沈下）は布田川断層の動きにより生じた派生断層の表層亀裂と考えられる。
- ⑤ 益城町市街地の木山断層上部の甚大な建物被害は木山断層運動による影響が主要ではなく、軟弱地盤の震動増幅によるものと考えられる。
- ⑥ 秋津川堤防の沈下は地下の軟弱層の震動沈下によると推定される。

参 考 文 献

- 1) 高田至郎：断層地表変位による熊本・益城町の水道管路破壊に関する分析、建設工学研究所論文報告集、第59号、平成29年11月（報告）
- 2) 高田至郎：Disaster Mitigation Measures Learned by Kumamoto Earthquake、中国国家地震局物理研究所セミナー、2018.7
- 3) 地震調査研究推進本部：布田川断層帯・日奈久断層帯の評価（一部改訂）について、2013、2
- 4) 益城町：平成28年熊本地震による下水道施設被害と復旧状況について、2016.6
- 5) 大島昭彦、中村優孝、平井俊之：熊本益城町における地盤調査と常時微動観測結果、都市防災研究論文集、第4巻2017
- 6) 島浦健生：文化財保存における3次元レーザースキャナーの有効活用と課題、技術発表会、2018.9
- 7) 高田至郎：Breakage of fault crossing water pipelines during 2016 Kumamoto earthquake and Measures for NPP(Nuclear Power Plant) Safety under Fault Movement、The 3rd International Seminar on Urban Disaster、BJUT(Beijing University of Technology)、2017
- 8) 森 友宏、松下克也、川崎淳志：平成28年熊本地震における熊本県益城町の建物被害および宅地地盤被害の悉皆調査、地盤工学ジャーナル、12巻4号、pp.439-455、2017
- 9) 菊池健児、田中 圭：益城町の悉皆調査、2016年熊本県地震災害調査報告会資料、2016年度日本建築学会大会（九州）災害部門 緊急報告会、2016.8
- 10) 青山雅史：土地履歴からみた液状化被害・水害の発生要因と危険度評価の検証、公益財団法人国土地理協会、第16回（2016年度学術研究助成）

著 者

高田 至郎	所員、神戸大学名誉教授、工博、地震工学
鋤田 泰子	研究員、神戸大学、博士（工学）、地震工学
武田 康夫	株式会社潮技術コンサルタント、学士、技術士、水道工学
東 俊司	積水化学工業株式会社、修士、技術士 下水道部門
田口 由明	株式会社エイト日本技術開発中部支社、技術士、下水道
北川 英二	芦森工業株式会社、博士（学術）、管路工学