

平成28年熊本地震による液状化・陥没による地盤被害

Report of Liquefaction and Subsidence due to the 2016 Kumamoto Earthquake

村上 哲 (むらかみ さとし)
福岡大学工学部 教授

永瀬 英生 (ながせ ひでお)
九州工業大学工学部 教授

大里 重人 (おおさと しげと)
土質リサーチ 代表

矢ヶ部 秀美 (やかべ ひでみ)
NPO 法人研究機構ジオセーフ

1. はじめに

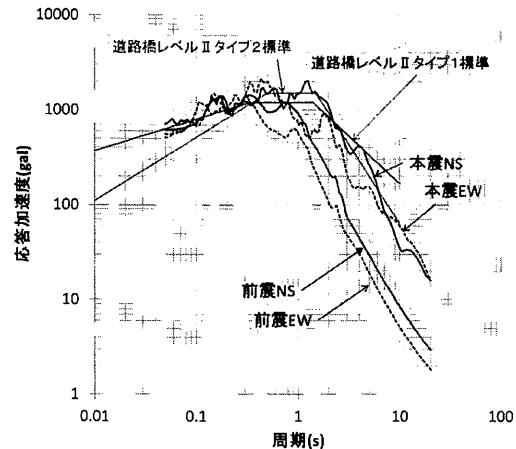
平成28年熊本地震では熊本県内11市町村で液状化が確認され、とりわけ、熊本平野においては広範囲で液状化が生じた。今回の地震の特徴でもある前震、本震と短期間に大きな地震外力が複数回作用したことや面的な広がりをもつ埋立地盤における液状化だけでなく、旧河道部や自然堤防部の一部で液状化の帯として現れたように限定的に生じているのが特徴的である。また、液状化現象は、阿蘇谷においても確認されるとともに、陥没沈下を伴う大きな地盤変状による被害も生じている。さらに、益城町においては秋津川沿いにおいて液状化による噴砂が確認されるものの、擁壁等の倒壊による宅地被害が顕著であった。これらの土質の多くが火山性由来の土質と思われる火山灰質土であり、この影響が地盤被害を甚大化した可能性も指摘される。本稿では、まず、熊本平野における液状化の状況と被害及び噴砂試料による物理的・力学的性質について調査した結果について述べる。次に、益城町及び阿蘇谷における地盤被害の特徴と地盤特性の視点からその状況について述べる。

2. 前震と本震の地震動特性

平成28年熊本地震では、4月14日21時26分熊本地方を震源とするM6.5の前震と、4月16日01時25分同地方を震源とするM7.3の本震、及び、その後の複数回の余震が特徴的である。特に、熊本県益城町では震度7の揺れが前震と本震で2回生じている。地盤の液状化被害も少なくともこの2回の地震の影響を受けていると考えられる。

図一1は、熊本市春日(気象庁)の前震、本震における加速度応答スペクトルを表している。同図には道路橋レベルIIタイプ1及び2地震動のⅢ種地盤における標準加速度応答スペクトルも示している。図より、熊本市春日(Ⅲ種地盤)では、前震、本震ともレベルIIタイプ2標準相当である。本震だけでなく、前震も十分大きな地震動であったと推測される。

このように今回の地震災害における特徴の1つは、前震、本震など大きな地震外力が複数回作用したことであろう。後述する液状化調査におけるヒアリングでも、前震で液状化した、又はしなかった。本震で初めて液状



図一1 加速度応答スペクトル(熊本市春日(気象庁))

化した、又は、再度液状化して被害が大きくなったなど様々である。このような違いは地域の地下水位と地盤状態などに起因すると思われる。

3. 熊本平野における液状化の状況とその被害

3.1 液状化の地域的特徴

口絵写真一8 (<http://urx.nu/bmG4>) は平成28年熊本地震により生じた現地調査による液状化被害等確認地点(赤)と空中写真判読による液状化確認地点(青)を国土地理院提供の治水地形分類図上にプロットしたものである。

現地調査はこれまでに平成28年4月22日より同年7月2日まで計12回実施した。現地調査は、まず、空中写真による液状化の噴砂状況の把握と旧版地形図や治水地形分類図等で従来液状化しやすいと言われている旧河道など微地形箇所をあらかじめ特定し、その地域を調査対象地域としている。現地調査では、噴砂の確認ができた場所は液状化発生と断定し、噴砂は確認できていなくても液状化に起因すると思われる建物周りの沈下や段差などが生じた場合も液状化による地盤変状と考えてプロットしている。

一方、空中写真判読に用いた情報は、国土地理院提供の空中写真(4月16日と4月22日撮影)の2種類の空中写真を重ね合わせて利用した。空中写真による液状化による噴砂を判読し、地図上にプロットした。

今回の液状化発生地点における特徴は、まず、白川沿

岸部であり、液状化地点が白川から枝分かれするように伸びているのが特徴的である（口絵写真—9）。これらの3つの枝は、微地形的には、自然堤防あるいは旧河道上に位置するものの、自然堤防上の一部で帯として生じている。この液状化の帯での被害は、建物沈下・傾斜、建物周りの沈下や段差、地中埋設物の浮き上がり、用水路底部の破損や壁体構造物の変位など、甚大な被害が限定的に生じている。

一方、緑川とその支流にあたる加勢川、木山川、秋津川では旧河道や氾濫原、自然堤防での被害が顕著である。坪井川の旧河道では大量な噴砂は確認できないものの建物の沈下・傾斜、建物周りの沈下が生じており、液状化の帯と同様に限定的である。

島原湾沿岸部の干拓地は緑川及び白川の河口部付近で液状化による噴砂が確認できるものの、建物被害はそれほど顕著ではない。これは表層地盤が軟弱であることから杭基礎や柱状改良などで軟弱地盤対策を講じているからだと推察する。埋立地では多量の噴砂が確認され、特に、白川河口部では長径280 cm、短径170 cmの楕円の噴砂孔も確認された。このように干拓地と埋立地による液状化の違いが明瞭に表れている。

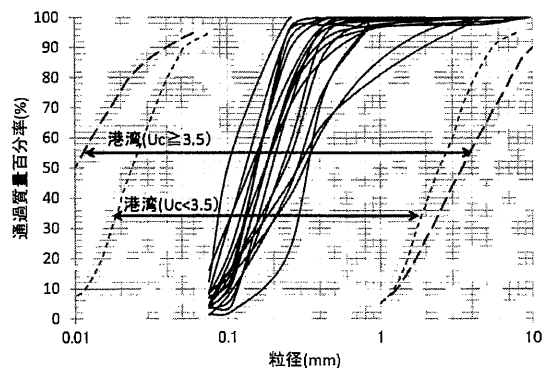
旧水田の埋立造成地と思われる下江津湖の熊本市動物園、熊本市東区沼山津から益城町にかけての秋津川と県道28号線間の低地でも液状化による被害が確認された。特に、沼山津から益城町にかけての被害は、震度7を前震と本震で経験した地域でもあり、地盤変状が多様化しており液状化だけの被害とは言い難い地区である。

このように、微地形区分だけでは、液状化の可能性は判別できず、自然堤防でも地盤の違いによって、液状化するかないかが分かれることが今回の地震でも分かる。

3.2 噴砂の物理的特性

現地調査において噴砂を採取した。噴砂の多くは灰黒色の砂であり、土粒子の一部には軽石を含んでいることから、噴砂は火山性由来の土質、すなわち、火山灰質砂と思われる（口絵写真—10）。そこで、熊本市南区近見において採取した噴砂について分析（テフラ組成分析・火山ガラスの屈折率測定）を群馬大学若井明彦教授の協力を得て行った。その結果、やや角がとれた、比較的新鮮なものや風化が進んだものと思われるわずかに円磨された岩片が多く含まれていることが明らかになった。ほかに、阿蘇カルデラ周辺の溶岩類や阿蘇カルデラ起源の火砕流堆積物、阿蘇中央火山口丘起源のスコリア質テフラなど多様な起源をもつ粒子が混在していることが分かった。また、試料中に鬼界アカホヤ火山灰（K-Ah、約7300年前）が混在していることから、分析対象の液状化した堆積物の形成年代は約7300年前以降と推定される。さらに火山ガラス、鉱物が多く含まれていた。より詳しくみると、火山ガラスではスコリア型、中間型、バブル型、軽石型の順に含まれており、鉱物では軽鉱物の割合が高い。つまり、全体的に比重が低いものが多く含まれていた。

採取試料に対し、簡易粒度試験（沈降分析を行わない



図—2 噴砂試料の粒径加積曲線

ふるい分けのみの試験）を実施した。得られた結果を図—2に示す。図より噴砂試料の粒径加積曲線は、港湾基準の液状化しやすい砂の分布範囲に収まっており、火山灰質砂だから液状化したということはこの図からは言えない。ただし、共通して言えることは、工学的分類では細砂あるいは細粒分混じり細砂に分類されることから、河川流下により分級され堆積した土質と推察される。

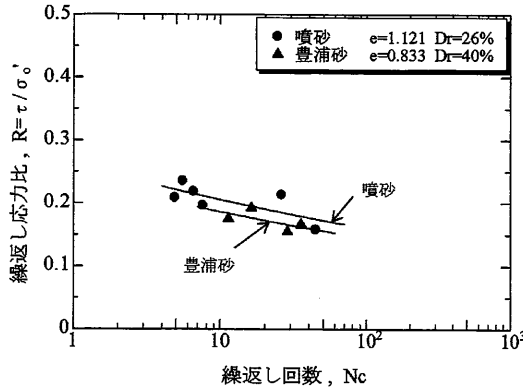
3.3 噴砂の力学特性

繰返し中空ねじり試験装置を用いて、熊本市南区近見で採取した噴砂の液状化試験と液状化後の静的載荷試験を行った。供試体は、外径10 cm、内径6 cm、高さ10 cmの寸法であり、水中落下法により締固め作用を与えずに緩い状態で作製した。

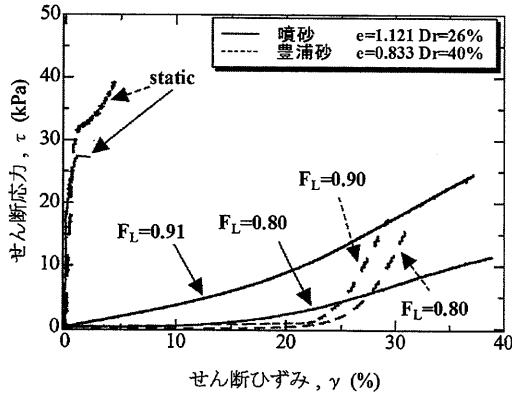
噴砂の物理的性質は、最大間隙比 $e_{max}=1.258$ 、最小間隙比 $e_{min}=0.687$ 、土粒子密度 $\rho_s=2.671 \text{ g/cm}^3$ となった。また参考までに豊浦砂についても同様の試験を行っている。豊浦砂の物理的性質は、 $e_{max}=0.981$ 、 $e_{min}=0.608$ 、 $\rho_s=2.645 \text{ g/cm}^3$ である。今回の試験では、土粒子密度に大きな差異は見られなかった。また、どちらの試料においても液性・塑性限界はともに NP という結果が得られた。ただし、本噴砂は、近見地区において地震時に井戸から大量に噴出したものであるため、分級の影響はほとんど受けていないものと考えられる。

図—3は、噴砂と豊浦砂における繰返し応力比 R と両振幅せん断ひずみ $DA=7.5\%$ に至るまでの繰返し回数 N_c の関係、すなわち液状化強度曲線を示したものである。豊浦砂の供試体は相対密度 D_r が40%であるのに対し、噴砂の供試体は相対密度 D_r で表すと26%と豊浦砂の場合よりも少し小さい値であった。ただし、噴砂の細粒分含有率 F_c が16%と高く、最大・最小間隙比の測定方法の適用範囲である5%未満を超えているため、 $D_r=26\%$ の値はここでは参考値としたい。図—3の結果を見ると、噴砂の方が豊浦砂に比べて液状化強度比 R_{120} が高いことが分かる。噴砂は細粒分を比較的多く含むため、液性・塑性限界が NP であるとしても、細粒分による粘性が発揮されて液状化強度が高くなったものと考えられる。因みに両者の液状化強度比 R_{120} は、噴砂において0.190、豊浦砂において0.172であった。

図—4に、噴砂と豊浦砂における液状化後の静的載荷試験で得られたせん断応力とせん断ひずみの関係を示す。



図一三 液状化強度曲線



図一四 液状化後の静的載荷試験によるせん断応力とせん断ひずみの関係

実線が噴砂、破線が豊浦砂の結果を示している。また static は繰返し載荷を行わずに静的載荷のみを行った場合の曲線を表している。豊浦砂の場合、せん断ひずみが 22% 程度まではせん断剛性がゼロに近く微小であり、そのせん断ひずみを超えると応力-ひずみ曲線が急激に立ち上がる傾向を示している。これに対し噴砂では、せん断の初期から豊浦砂に比べてせん断剛性が大きく、またせん断ひずみの増加に対してせん断剛性が緩やかに増加する傾向も見取れる。これは噴砂に含まれる細粒分の影響により、供試体が液状化したとしても粘着成分が多少なりとも発揮されるために、せん断初期からせん断抵抗を示したものと考えられる。このことから本噴砂の場合には建物の沈下・傾斜等の被害がきれいな砂の場合に比べ多少軽減されるのではないかと考えられる。

3.4 液状化の帯と地盤特性

上述した液状化の帯は、地盤の堆積構造の違いが被害に表れたと考え、口絵写真一9に示した近見地区から八幡地区にかけて生じた液状化の帯の一部の地点で、既存の地盤情報を用いて道路橋示方書(平成24年)レベルIIタイプ2地震動による液状化判定を行い、液状化の帯の内外での液状化層の違いを検討した。口絵写真一11はその結果である。まず、(a)の刈草付近の結果を見ると、いずれの地点も地下水位が高いところは共通している。また、液状化層 ($F_L < 1.0$) は、いずれの地点も下部に液状化層が存在するが、液状化の帯の地点では上部にも液状化層が存在する点が特徴的である。(b)の城南

中学校付近の地盤も液状化の帯へ向かうに従い、上部で液状化層が厚くなっている傾向が確認できる。この地点の20 mまでの堆積状態は不明であるが、おそらく、(a)と同様、下部層にも液状化層があると思われる。以上のように、液状化の帯で上部の液状化層が厚くなっていることが確認されることから、液状化の帯として現れた地盤では表層に液状化の可能性がある砂質土層が堆積したためであると考えられる。すなわち、液状化の危険度を評価するためには、その地盤における液状化層の有無、層厚が重要であり、また、被害の甚大化については、液状化層が表層付近に存在するかどうかは鍵であると思われる。

3.5 液状化対策に対する課題

宅地を対象とした液状化危険度評価¹⁾は主としてめり込み沈下による影響について検討される場合が多く、その評価方法には、上部の非液状化層厚が3 m, 5 mを閾値として区別される。上部非液状化層厚が厚くなれば、めり込み沈下による被害は小さくなることから、建物被害も小さくなるという考え方である。水平堆積地盤においては、この考え方を適用することが可能と思われるが、深部液状化層厚が変化する場合には、敷地内における沈下量の大きさが変化することも考えられるため注意を要する。すなわち、熊本地震において被害が生じたような液状化の帯や旧河道における液状化被害では、液状化層厚が不連続に変化している場合や、急変していることも考えられるため、しっかりした地盤調査と液状化による地盤の沈下や変状を予測することが必要である。また、熊本市では、熊本市地下水保全条例で地下工事における地下水への影響防止が義務づけられており、地下水位低下工法における地下水流動への影響や地盤改良による地下水への影響が無いように施工することが必要であり、従来の液状化対策に加えて、検討すべき項目は多い。

4. 益城町及び阿蘇谷における地盤変状と被害

4.1 益城町の地盤に関わる被害状況

熊本地震における宅地被害は、液状化のみならず丘陵地においては火山灰質粘性土の地盤において被害が生じている。とりわけ、2つの大きな地震の震源に近い熊本県益城町では、両地震において最大震度7を2回経験するなど、極めて甚大な被害が生じた地域である。ここでは、熊本県益城町でも県道28号線と秋津川に挟まれた地域において、地盤災害の状況を現地調査結果に基づいて報告する。口絵写真一12は報告調査範囲を示している。

益城町福富地区及び惣領地区では、建物周りの沈下、建物の傾斜及び不同沈下、擁壁や水路などの倒壊・破損、マンホールの浮き上がりや道路の凸凹、電柱の沈下・傾斜、井戸の破損など多様な被害が生じている(口絵写真一13~15参照)。本調査では、明瞭な噴砂跡は確認できなかったが、自然地盤の液状化による被害と埋戻し土のそれとが混在しているように見受けられた。安永・宮園地区でも、上記同様の被害が確認された。水部埋め立て

地と低地部では噴砂らしき砂が確認できた。なお一部では下水道工事などの埋戻し土が液状化した部分も見受けられた。また、液状化に起因する被害だけでなく、宅地地盤の変状、とりわけ、擁壁等壁体構造物が、基礎地盤の支持力不足によるめり込みと損傷により大きく地盤変位が生じ、建物被害を甚大化させた様子がうかがえた。場所によっては、広い範囲にわたって地すべり的な滑動を生じている可能性もある。対象地域の地盤構造の把握も含めた、詳細な調査が必要だと思われる。

4.2 益城町の被害と地形・地質・地盤

現地調査による被害地点や空中写真による噴砂判読地点は、口絵写真—16と17に示すように、旧版地形図及び治水地形分類図と重ね合わせると、その多くが、旧河道部とその周辺の地盤に位置することが分かる。また、旧版地形図では、自然堤防上に居住区が認められることから、被災地点の多くは近年宅地化した地盤、特に、湿田を埋め立て造成した地盤であることがうかがえる。

口絵写真—18は地盤調査結果の土質名称だけでなく、記事にも着目して、地盤断面図を描いたものである。各断面の位置は口絵写真—17に示している。このように、益城町の地盤は秋津川近傍では沖積層の堆積地盤であり、一方、宅地となる比較的標高が高い地区においては、表層から黒ぼく、赤ぼく、その下に、阿蘇4火砕流堆積物が存在する。阿蘇4火砕流堆積物は上から粘性土の灰土、砂質土、礫質土と堆積するが、黒ぼく、赤ぼく、灰土は N 値が極めて低く、軟弱地盤であることが分かる。

当該地域の復旧・復興に当たっては、秋津川沿いの南側に位置する沖積地盤と北側に位置する火山灰質粘性土地盤を区別し、それぞれの地盤に応じた対応策を講じることが必要であると考えられる。

4.3 阿蘇谷における地盤に関わる被害状況

阿蘇谷においては、熊本平野部同様、液状化が確認されている。口絵写真—19は空中写真判読による噴砂と噴水の分布を示している。背景図には熊本県地質図²⁾を用いた。この地域における噴砂判読においては、農耕地において生じたものが多く、液状化による噴砂によるものと、耕作地内に埋設した排水管の損傷により漏水したものが地表に吹き出し噴水が生じたものと2種類がある。空中写真判読においては、この両者を明確に判別することが困難であったため、ここでは両者を区別することなくプロットしている。噴砂・噴水地点は阿蘇谷におけるカルデラ底堆積物と扇状地堆積物上に広範囲で分布存在することが分かる。その多くは耕作地における液状化の被害が顕著であり、側溝への噴砂の埋没や、排水設備、埋設管の損傷が生じているものと思われる。このため、作付けが困難な水田が多かったと予想される。また、液状化によるものかどうかは不明であるが、堤防や道路の

段差や亀裂の被害があった。

阿蘇谷における地盤変状は熊本平野部のそれに似ているものの、これに加えて、地盤が帯状に陥没する現象が生じている(口絵写真—20)。口絵写真—19は阿蘇谷において生じた亀裂(クラック)を空中写真から判読した結果を図中に示している。これを見ると分布は帯状に断続的に伸びているようにも見受けられる。その多くはカルデラ底堆積物にて生じていることが分かる。

阿蘇谷で生じた陥没現象については、未解明な部分が多くその要因については、断層、液状化、空洞陥没、高有機質土層の圧縮変形などいくつか挙げられている。今後、当該地域の復旧や対策においては、このメカニズムの解明が急務であると考えられる。

5. ま と め

本稿では、まず、熊本平野における液状化の状況と被害及び噴砂試料による物理的・力学的性質について調査した結果について述べた。粒度特性からは火山灰質砂が特に液状化しやすいとは判断できなかったこと、中空ねじり試験装置を用いた液状化強度試験及びその後の静的せん断試験により噴砂試料と豊浦砂を比較した結果、噴砂は細粒分の含有の影響により、液状化強度はやや大きく、液状化後の初期におけるせん断剛性はやや高い値を示すことが明らかになった。

次に、益城町及び阿蘇谷における地盤被害の特徴を現地調査結果に基づいて示した後、被害の状況と地域性について、地形・地盤・地質の観点から論じた。その結果、益城町の宅地被害は液状化のみならず、火山灰質粘性土による影響が考えられること、阿蘇谷の陥没については、そのメカニズム解明の必要性を示した。

今後、さらに詳細検討を実施し、災害復旧・地域復興に役立つ知見を得たい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、熊本県土木部、熊本市土木部、熊本県益城町、及び、九州旅客鉄道(株)に地盤情報データの提供をいただいた。また、国土地理院より空中写真及び治水地形分類図のデータを提供いただいた。また噴砂試料の分析結果(テフラ組成分析・火山ガラスの屈折率測定)を群馬大学若井明彦教授に提供いただいた。さらに気象庁の地震観測記録を使用させていただいた。付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：市街地液状化対策推進ガイドンス(本編)、p. 180, 2016.
- 2) 熊本県地質図編集委員会：電子版熊本地質図(CD版)、(株)熊本県地質業協会、2008.

(原稿受理 2017.1.18)