

熊本地震における微地形と液状化要因の関係性

北澤 聖司¹・原 忠²・中島 昇³・柴原 隆⁴、林 伸二郎⁵

¹正会員 第一コンサルタンツ 設計部 (〒781-5105 高知県高知市介良甲 828-1)

E-mail: m-kitazawa@daiicho-c.co.jp

²正会員 高知大学教授 防災推進センター (〒780-8520 高知県高知市曙町 2-5-1)

E-mail: haratd@kochi-u.ac.jp

³正会員 地研 事業部 (〒780-0974 高知県高知市円行寺 25)

E-mail: n-nakajima@k-chiken.com

⁴学生会員 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙 200)

E-mail: s48ryu1212@gmail.com

⁵非会員 高知大学農学部 自然環境学コース (〒783-8502 高知県南国市物部乙 200)

E-mail: phalacrognathus.muelleri111@gmail.com

2016年(平成28年)4月に発生した熊本地震では、熊本市南区の自然堤防において限定的な帯状の液状化が確認された。同じ地形区分と判定された範囲において液状化の発生状況が異なる要因を明らかにすることは、今後の液状化危険度評価の精度向上を図るうえで重要である。本稿では、微地形の特徴や地盤材料の差異が液状化の発生に及ぼす要因を検討するため、同じ範囲の微地形区分で被災の程度に差が見られた熊本市南区砂原町周辺を対象として現地調査を行った。調査内容は、液状化の主たる要因である地下水位、地盤の貫入抵抗および粒度特性の把握である。その結果、微地形区分では把握できない地形の変遷や形成過程が液状化発生要因に関係していることを明らかにするとともに、流域の特徴を示す地盤材料の存在を示した。

Key Words: Kumamoto Earthquake, liquefaction, micromorphology, natural levee

1. はじめに

2016年4月14日(前震)、16日(本震)に発生した熊本地震では、熊本平野部において白川、緑川およびその支川沿い、有明海沿岸部の干拓地の広い範囲で液状化が確認された^{1,2,3}。特に、熊本市南区の内陸部に位置する自然堤防では長さ約7km、最大幅100mにわたって液状化が確認され、『熊本内陸部に「液状化の帯」、旧河道か』の見出しで報道⁴された。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震でも、東京湾岸の埋立地や利根川下流域の旧河道・旧沼地などにおいて液状化が確認され、地形条件と液状化被害の関連性⁵が社会的に注目を集めている。

微地形は、地盤の成因、形態、構成する物質、形成時代がそれぞれの基準の中において等質であるものをまとめた単位であり、表層地盤の性状との間には密接な関係があることが知られている⁶。この特性を踏まえ過去の地震による液状化履歴から液状化発生の難易と微地形の関係に関する多くの研究が行われている^{7,8,9}。

液状化の発生を予測する手法としては、①前述の地形・地質や液状化履歴を元にした概略の予測手法、②土質調査・既往のボーリング結果を元にした簡易な予測手法、③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な予測手法がある¹⁰。

兵庫県南部地震以降では、前述の予測手法①～③をグレード別に体系化し、レベル2地震動に対応した予測手法として、国土庁防災局により「液状化地域ゾーニングマニュアル」¹¹(以下、「ゾーニングマニュアル」と略称する)が公表されている。さらに、微地形区分の統一の整理やメッシュサイズの細分化¹²が図られ、ゾーニングマニュアルに準拠した液状化ハザードマップが多くの自治体で作成され、全国規模で地域防災計画に活用されている¹³。

一方で、ゾーニングマニュアルに準拠して作成され、地震前に熊本市が公表した液状化ハザードマップ¹⁴では、低平地のほぼ全域で「液状化の可能性が極めて高い」と予測され、実際の液状化発生状況との乖離が課題となっている¹⁵。現在、汎用的に適用されている広域を対象と

した予測手法では、ボーリング試験結果が少ない地域の内挿補間において課題が見られる。その補間情報として微地形区分や地形分類情報の精度向上が求められている¹⁶⁾。また、ハザードマップでは現在整備されている微地形区分データを適用する関係から、250m メッシュで表示される場合が多い。しかし、熊本地震にみられるように液状化は狭い範囲で発生することが多く、メッシュ表示では対応できない課題が指摘されている¹⁷⁾。

熊本地震で帯状の液状化が確認された自然堤防は、微高地を形成することから、江戸時代より居住地や交通路として利用されてきた¹⁸⁾。現在においても住宅密集地であり、多くの住宅が液状化被害を受けた。自然堤防は、「液状化の可能性が大」である微地形と判定¹¹⁾されているが、埋立地や旧河道などを対象とした液状化被害の研究事例に比べて自然堤防を対象とした事例は少ない。南区周辺の自然堤防では、同じ微地形と判定された区域でも場所によって地形・地盤特性が異なることが考えられる。この特性を明らかにすることは、住宅地など資産が集積する液状化の可能性が高い微地形における今後の予測精度向上において重要と考えられる。

本稿では、同一の自然堤防と判定されながら液状化の発生状況が異なった南区周辺で、メッシュ表示では把握できない領域を対象とする。液状化の主要要因である地震動の条件が等価と考えられる調査範囲を設定し、現地調査により地下水位、地盤の貫入特性および粒度特性を把握する。これにより、自然堤防における地形と地盤特性の関連性を明らかにし、地形の形成過程に着目して液状化の発生が異なった要因について考察する。

2. 研究対象範囲および調査地点の設定

(1) 熊本市南区における液状化発生状況

熊本市南区における限定的な帯状の液状化発生地点³⁾を図-1に示す。この区域は、白川において河口より8km上流の湾曲部付近から、その南側に位置する加勢川までの範囲に位置している。熊本市における液状化被害を受けた家屋は、図-1に示す①の範囲に最も集中しており、約1,300戸に傾斜や沈下などの被害が見られた。そのほかの区域を合わせて、市内全域で約2,900戸の被害が報告³⁾されている。

(2) 熊本平野における河川状況

熊本平野は、白川および緑川の堆積作用によって形成された沖積低地である。南区における液状化が発生した自然堤防の形成と関係する白川の河川特性について、流域が隣接する緑川と合わせて示す。その流域図¹⁹⁾を図-2に示す。白川の特徴は、活火山である阿蘇山のカルデラ



図-1 熊本市南区における液状化発生位置³⁾
(調査範囲、調査地点位置を加筆)

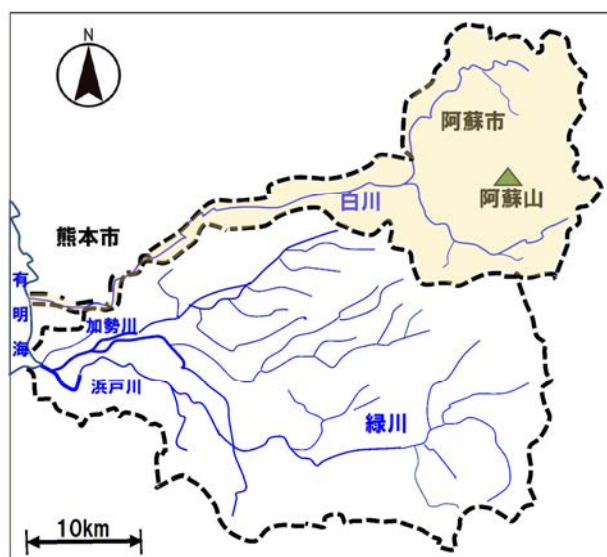


図-2 白川・緑川流域図²⁰⁾

全域が上流域に位置し、流域面積の約80%を占めることである。1953年6月に発生した白川水害では、熊本市内で白川が溢水氾濫し阿蘇カルデラから流出した火山灰質砂質土が市内中心部で約10～75cm堆積した¹⁹⁾。白川では上流に活火山が位置することから土砂生産が盛んであり、天井川という河床が周辺の地盤高より高くなる特性を示している¹⁹⁾。熊本市付近では1953年6月水害のように洪水時に溢水氾濫を繰り返すことにより河川周辺に自然堤防が形成されている。白川下流の熊本市南部では白川から枝分かれするように複数の自然堤防が分布しており、県庁所在地クラスの都市における自然堤防の規模としては国内最大である²⁰⁾。

(3) 調査対象範囲の選定

図-1の①～②における液状化発生地点の微地形区分は自然堤防である。図-1の②付近におけるA地点において、筆者らは、2016年5月より液状化被害調査^{21), 22), 23)}を継続してきた。本研究では、自然堤防で限定的に液状化が発生した地域のうち、これまで継続してきた調査地点を含め、自然堤防の一部に旧河道が確認される南区砂原町周辺を



図-3 液状化被害状況(左：農地における噴砂，地割れの状況，右：水路付近の民家の状況)

調査対象として選定した。図-1にその範囲を赤枠で示す。旧河道は現在の河川との関わりを示し，同じ河成地形である自然堤防との関連性も考えられる微地形である。

調査範囲の液状化は，図-1に示す白川の河口から7.2kmに設置されている十八口堰から取水された水路に沿って帯状に発生している。

この範囲における液状化は前震と本震の両方で発生したものが多く，住宅地および畑などの農地において噴砂・噴水および地割れが多数見られた。幹線水路沿いの住宅では建物の変状や不同沈下が見られた。被害の状況を図-3に示す。

(4) 調査地点の設定

調査地点の設定にあたっては，調査範囲周辺の地域住民を対象に聞き取りを行い，液状化被害の有無，発生時の状況などを確認して参考とした。調査地点は，調査範囲における微地形区分を考慮し，自然堤防，旧河道，氾濫平野に位置する液状化発生地点，非液状化地点を選定した。本調査における液状化発生の定義は，現地踏査および現地の地域住民からの聞き取りなどにおける噴砂の有無を基準とした。

治水地形分類図²⁴⁾を背景に調査地点を図-4に示す。図

には後述する地下水位調査の測線，既往ボーリング調査位置を合わせて示す。

自然堤防では，A～Cの3地点を設定した。A地点は，噴砂や周辺の家屋で不同沈下が確認され，地震直後の2016年5月より継続して調査している地点である。B地点は，水路に面した住宅敷地であり，住宅の一部が不同沈下した液状化発生範囲の境界部に位置している。B地点では被災者の聞き取りを行った。聞き取りによると，噴砂は，前震，本震ともに発生し，本震のほうが噴き上げが高かった。家屋は水路側が0.15m沈下したが，水路の反対側では噴砂は発生せず，沈下も起こらなかったとのことである。そこで，B地点では液状化が発生した水路側と住宅を挟んだ反対側の非液状化地点の2地点を設定した。C地点は，液状化が周辺で確認された水路より約200m離れた非液状化地点である。

旧河道・氾濫平野ではD，Eの2地点を設定した。D，E地点でも被災者の聞き取りを行った。D地点は畑地で，水路に近い液状化発生地点，水路から離れた非液状化地点の2地点を設定した。E地点は住宅敷地内の液状化発生地点である。F地点は，自然堤防の北側に分布する氾濫平野の水田に位置する非液状化地点である。B，D，E地点の液状化発生地点と非液状化地点の位置関係を示す詳細図を図-5に示す。図-5には聞き取りおよび国土地理院の地震直後の空中写真²⁴⁾をもとに噴砂位置を示す。

3. 調査方法

(1) 地盤のサウンディング調査

液状化発生地点および非液状化地点において地盤の貫入抵抗特性を調査した。調査方法は動的簡易貫入試験²⁵⁾(以下，PDCPと略称する)を用いた。この手法は機動



図-4 調査地点位置図(背景：治水地形分類図²⁴⁾)

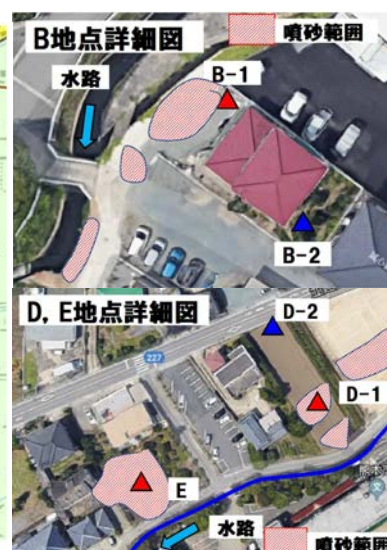


図-5 B, D, E 詳細調査地点位置図

性があり、個人住宅の敷地内でも簡易に調査を行え、調査時に発生する騒音・振動などが軽微で地盤の貫入抵抗を評価できる実績を有する。

(2) サンプル調査

PDCP では土質の判別ができないため、各調査地点において、簡易な方法で表層地盤付近の土層断面を採取できるハンディジオスライサー²⁰⁾(以下、HGS と略称する)を採用した。HGS は堆積構造を乱さずに、幅約 6~10cm、深さ最大 2.5m、厚さ約 2~3cm のブロックサンプルを採取できる方法で、従来の調査機材と比べて少人数で簡便にサンプリングできる手法である。

この他、地震発生直後の現地調査時に A 地点、聞き取り時に E 地点において噴砂を採取した。

(3) 地下水位調査

地下水位は重要な液状化要因のひとつである。現地調査の対象範囲において井戸水利用がなされていることが判明した。そこで、図-4に示す調査範囲のほぼ中央に位置する A 地点を通る水路に直交する測線を設定した。測線周辺に位置する浅井戸を対象として井戸内の地下水位を調査することで、調査範囲における地下水位状況を把握した。調査は地下水位の季節変化を考慮して 2018 年に 3 季(1, 4, 8 月各季 1 日)行った。

(4) 室内土質試験

各調査地点でサンプリングした試料の代表的な土質を抽出し、室内土質試験として土粒子密度試験および粒度試験を行った。さらに、粒度試験結果を踏まえ、必要に応じて液塑性限界試験を行った。

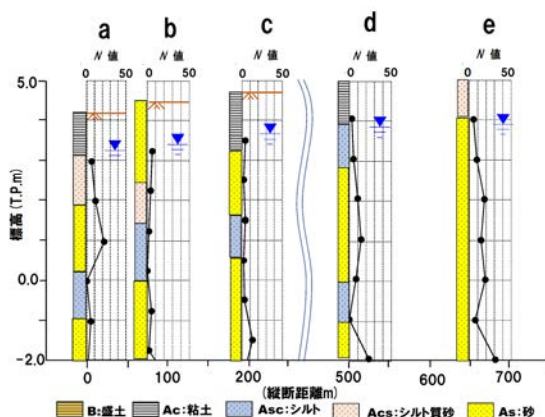


図-6 調査範囲周辺における既往ボーリング調査結果²⁾

4. 現地調査結果と地盤特性の推定

(1) 調査範囲周辺の地盤特性

A から B 地点が位置する自然堤防周辺で、液状化発生地点に近い県道 227 号に沿って既往ボーリング調査²⁾が行われている。ボーリング調査位置を図-5の a~e に示し、ボーリング結果を図-6に示す。

調査範囲における自然堤防の地盤特性の概要を把握するとともに、PDCP 結果の妥当性を検証するために既往ボーリング調査を参考にした。県道 227 号付近では、地表から 1~2m の深さから層厚が 3~4m 以上で N 値 5~10 未満の緩い砂質土がある。砂質土は、細砂またはシルト質砂で細粒分が多い。

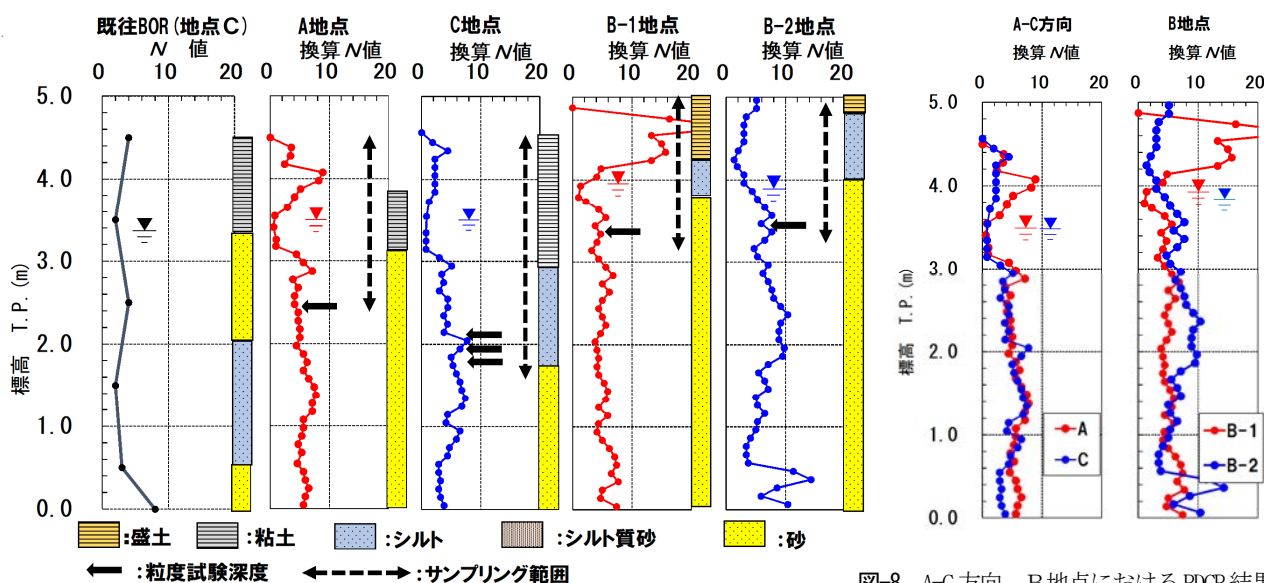


図-7 自然堤防における PDCP 結果及び土質区分

図-8 A-C 方向, B 地点における PDCP 結果の比較図

(2)PDCP結果

PDCPおよびサンプリング試料をもとに土質区分した各調査地点における地盤の貫入抵抗値の結果は、調査地点の位置する微地形で区分し、A地点からC地点を自然堤防、D地点からF地点を旧河道・氾濫平野として整理した。

PDCP結果は、PDCPによる貫入値である N_0 値を岡部²⁹⁾らの換算式で N 値に変換して示す(以後、図中には「換算 N 値」と表記し、文中では N 値と略称する)。換算する際の土質区分は、図-6に示す既往ボーリング調査結果とPDCPの換算 N 値との相関およびHGSによってサンプリングした範囲の土質を参考として推定した。

a) 自然堤防における調査地点のPDCP結果

自然堤防における N 値および土質区分を図-7に示す。PDCP結果の妥当性を検証するため、A地点とその近傍の図-6の「c」の浅層部と比較した(図-7 既往BOR(地点C))。既往調査ではT.P.3.0m付近にシルト質砂が確認され、小さい N 値を呈しているが、その上下の砂質土では N 値5前後と同じ値を示している。これよりPDCPの貫入抵抗値は近傍地盤の標準貫入試験値と同等の結果を示しており、PDCPの N_0 値を用いた N 値の推定は妥当といえる。PDCP結果の赤色は液状化発生地点を、青色は非液状化地点を示す。同図にはサンプリング範囲および後述する粒度試験の試料採取位置も合わせて示す。

液状化が水路の近傍で発生していることから、発生状況の違いは水路からの距離が関係すると考えられる。そこで、水路の流下方向に直交する方向でPDCP結果を比較した。A～C地点、B-1～B-2地点の N 値を重ね合わせた結果を図-8に示す。A地点(液状化)とC地点(非液状化)の N 値は、T.P.3.0mから以深で N 値5～7とほぼ同じ傾向を示す。A地点の土質は、サンプリングされた範囲では

T.P.3.0mからシルト質砂または細砂であるのに対し、C地点の土質は、T.P.3.0から1.2mの深さでシルトが主体である。調査地点が160m離れたA～C方向では、水路に近い側は砂質土であり、水路から離れるに従い細粒分が増加してシルトに変化したと考えられる。

B-1地点(液状化)とB-2地点(非液状化)では、B-2地点の N 値が、T.P.4.0mから2.5mの範囲でB-1地点の1.5～2.0倍を示している。この2地点は18mと近接しており、サンプリングした範囲ではT.P.4.0mから以深で同じシルト質砂および細砂である。

b) 旧河道・氾濫平野における調査地点のPDCP結果

旧河道・氾濫平野における N 値および土質区分を図-9に示す。この地形区分における土質構成は、砂質土の上下に粘性土が分布している。この調査範囲では異なる地形区分の比較となるため、同じ旧河道で液状化地点と非液状化地点が近接したD-1～D-2地点と、異なる地形区分であるE-F地点の比較を行った。D-1～D-2地点方向、E-F地点方向の N 値を重ね合わせた結果を図-10に示す。D-1(液状化)～D-2(非液状化)地点方向では、D-1は緩い N 値5-7の砂質土であり、D-2は N 値7-10でシルトが主体である。シルト主体のD-2の N 値が大半の深度で砂質土のD-1の値を上回っている。この傾向は自然堤防のB地点と同じ傾向を示しているが、D地点では近接する2地点の土質は異なっている。

E-F地点方向では、液状化が発生しているE地点の N 値がT.P.1.5～0.5の範囲で10前後を示し、液状化地点では自然堤防を含め最も大きな N 値を示している。土質はサンプリング範囲ではシルトおよびシルト質砂で細粒分が多く、非液状化地点であるD-2と類似している。非液状化地点であるF地点は氾濫平野に位置している。 N 値は5以下を示し、シルトを含まない緩い細砂である。F地

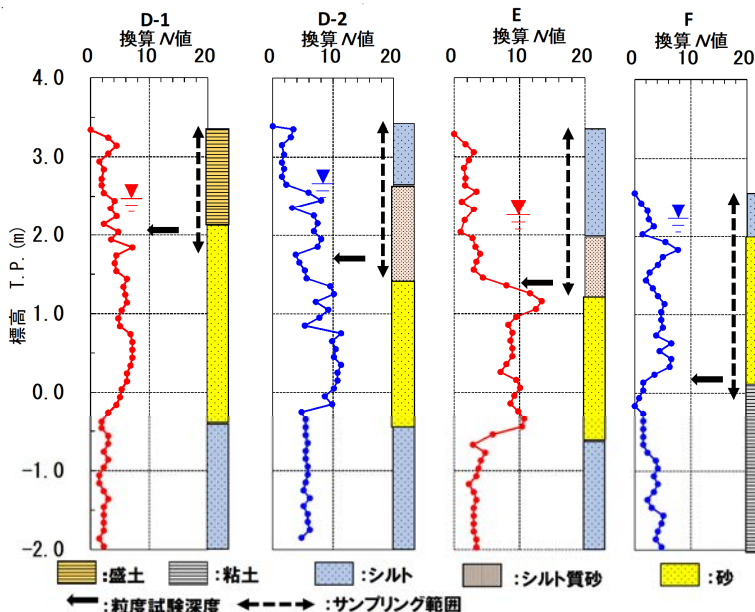


図-9 旧河道・氾濫平野における PDCP 結果及び土質区分

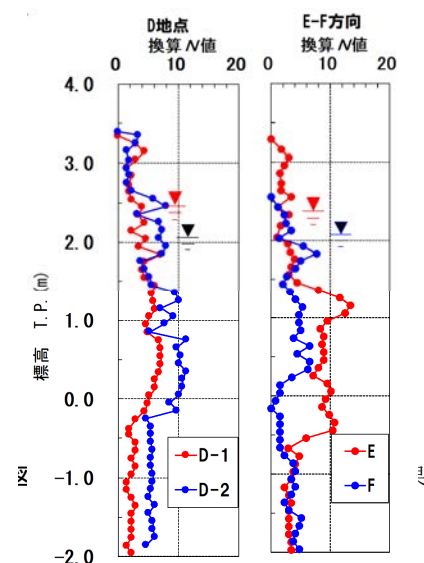


図-10 E-F 方向, D 地点における PDCP 結果の比較図

点が位置する調査範囲北側の氾濫平野では、図-1 に示すように県道熊本港線までの約 500m 以上の範囲で液状化が確認されていない。氾濫平野は自然堤防の後背地にあたり、単に N 値や土質だけではなく地形区分としての堆積環境の違いが考えられる。

(3) 各調査地点の試料における室内土質試験結果

a) サンプルングおよび室内土質試験結果

PDCPの各調査地点において土質を把握するために、HGSを使用して表層地盤をサンプルングした。その範囲及びサンプルング試料から各土層の試料を採取した深度は各PDCP結果の図-7, 9に示すとおりである。

サンプルング状況は、地下水位以深の地質により異なった。液状化発生地点では、地下水位以深の砂質土がHGSのサンプルングトレーの引き上げ時に脱落し、液状化層と想定される砂質土の上部付近しか採取できなかった。脱落が生じた場合のサンプルング範囲以深の土質は砂質土と想定した。非液状化地点ではシルトが多く、細粒分含有率 F_c が大きいことから最大の2.5mまでサンプルングできた地点があった。

各調査地点におけるサンプルング試料の代表土層を対象とした室内土質試験結果、採取深度における N 値、水路からの距離を表-1に示す。

b) 各調査地点の粒度組成

自然堤防、旧河道および氾濫平野に位置するA～F地点におけるサンプルングで採取した試料の粒度組成を図-11に示す。図-11には、各調査地点の微地形区分別、液状化、非液状化別で結果を示す。凡例の「堤防」は自然堤防を、「液」は液状化、「非」は非液状化を示す。同図には現地調査で採取したA地点およびE地点における噴砂を「噴」として示す。また、比較のために「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁹⁾(以下、港湾基準と略称する)に示される均等係数 U_c が3.5未満の場合の「特に液状化の可能性あり」(以降、範囲Aと略称する)と「液状化の可能性あり」(以降、範囲Bと略称する)のそれぞれの範囲を示す。

自然堤防の液状化発生地点の粒度組成は、 F_c に差が見

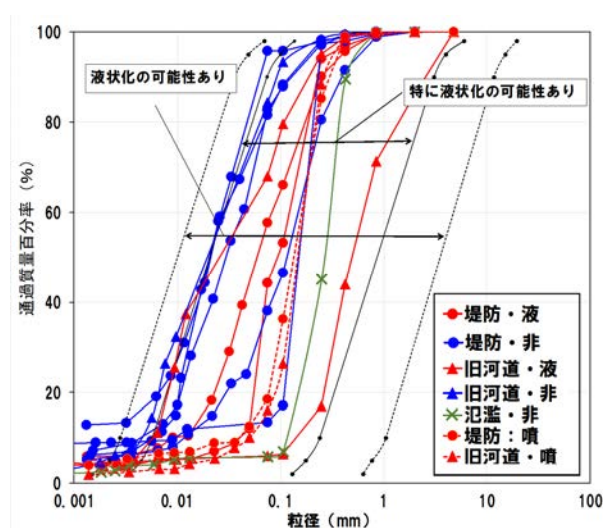


図-11 各調査地点における試料の粒度組成

られるが平均粒径 D_{50} は近似し、均等係数 U_c も10未満と同じ傾向で範囲Aの中央付近を示す。 D_{50} は細砂からシルトを示す。非液状化地点のうち、液状化発生地点の近傍の粒度組成は、液状化発生地点と同じ範囲Aの中央付近を示す。調査地点の結果から、液状化の有無にかかわらず、水路から約40mの範囲で、細砂またはシルト質砂の粒度組成、地盤材料を示している。水路から200m離れた非液状化地点の3試料の粒度組成は、 F_c が80%以上を示すシルトで、範囲Aの下限と一致している。水路から離れた地点では、粒度組成から液状化の可能性の低い地盤材料であることが裏付けられる。

旧河道の液状化発生地点の粒度組成はバラツキが見られ、 D_{50} が中砂を示して範囲Aの上限付近を示すものと、 D_{50} がシルトで、範囲Aの下限付近を示すものに分かれる。非液状化地点は、 F_c が84.1%、 D_{50} がシルトを示し範囲Aの下限とほぼ同じである。自然堤防の水路から離れた非液状化地点と同じ粒度組成を示す。旧河道における液状化、非液状化と粒度特性の関係は自然堤防に比べるとバラツキが見られ明確な特性を示していない。

氾濫平野の非液状化地点の粒度組成は、 F_c が5.8%、 D_{50} が中砂で範囲Aの中央より粒度が大きい側を示し、自然堤防の液状化地点の粒度組成より粗い。

表-1 各調査地点におけるサンプルング試料の室内土質試験結果(着色部は液状化発生地点を示す)

調査地点	地形区分	液状化 あり○	地盤T.P. (m)	地下水位 (T.P.m)	調査深度		土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	平均粒径 D_{50}	細粒分含有率 F_c (%)	粘土分含有率 C_c (%)	塑性指数 I_p	U_c	換算 N 値	水路からの距離 L(m)
					GL - m	(T.P.m)								
A	自然堤防	○	4.50	3.50	-2.00	2.50	2.780	0.061	57.7	6.9	N_p	9.3	4.1	31
	噴砂	○	—	—	—	—	2.725	0.147	18.5	6.0	—	4.4	—	
B	B-1 自然堤防	○	4.87	3.94	-1.50	3.37	2.801	0.095	44.3	4.5	N_p	3.2	4.7	16
	B-2-1 自然堤防	×	5.50	3.80	-2.10	3.40	2.472	0.121	38.1	6.7	N_p	13.9	6.8	34
	B-2-2 自然堤防	×	—	—	-2.20	3.30	2.603	0.165	13.4	9.2	—	19.1	7.1	
C	C-1 自然堤防	×	4.57	3.47	-2.50	2.07	2.696	0.021	81.6	8.7	N_p	4.7	7.7	198
	C-2 自然堤防	×	—	—	-2.60	1.97	2.538	0.021	95.8	16.7	—	20.3	6.5	
	C-3 自然堤防	×	—	—	-2.70	1.87	2.529	0.030	82.7	10.4	—	9.4	5.0	
D	D-1 旧河道	○	3.34	2.49	-1.25	2.09	2.767	0.518	6.0	4.8	—	4.4	4.8	17
	D-2 旧河道	×	3.39	2.72	-1.65	1.74	2.654	0.032	84.4	12.0	N_p	9.9	7.4	49
E	旧河道	○	3.29	2.44	-1.90	1.39	2.541	0.059	59.1	7.7	N_p	11.9	6.2	10
	噴砂	○	—	—	—	—	2.592	0.161	16.0	2.8	—	3.7	—	
F	氾濫平野	×	2.56	2.11	-2.45	0.11	2.757	0.269	5.8	3.9	—	2.3	1.5	164

現地調査でサンプリングした自然堤防のA地点および旧河道のE地点で採取した噴砂の粒度組成は、 F_{60} 、 D_{50} および U_c の物理特性がいずれも類似しており範囲Aのほぼ中央を示す。それぞれの地形区分で採取した試料に比べて F_{60} が小さいことが特徴である。これは噴砂としての分級作用や、調査では採取できていない深部の砂質土層から発生した可能性が考えられる。

(4) 微地形区分における液状化発生要因の推定

各調査地点におけるPDCP結果および粒度組成より、微地形の地盤特性から液状化発生要因の違いを推定した。自然堤防のA～C方向における液状化発生要因の違いは、砂質土とシルトの地盤材料の差異と考えられる。液状化、非液状化地点が近接した地点では、同じ地盤材料である砂質土における N 値の違いが示す密度の差異と考えられる。

旧河道では、液状化発生地点および非液状化地点の N 値の傾向と地盤材料の関係にバラツキが見られ、自然堤防のように液状化発生の要因の違いは明確に示されなかった。D地点の液状化発生の境界部においては、地盤材料が異なるが、自然堤防の液状化境界部と同様に非液状化地点の N 値が液状化地点の N 値を上回る地盤特性が見られた。

(5) 地下水位調査結果

A地点を通り水路に直交する横断測線近傍に位置する浅井戸を対象とした地下水位調査結果を図-12に示す。図-12にはA地点を通る測線のDEMデータを用いた横断面図(地形変化を強調するため縦軸を横軸の100倍で表示、地盤高読み取り間隔20mピッチ)を示す。測線から離れた調査地点は、平面図上で横断測線上に垂線を下ろした位置を横断面図上に投影している。図中の各調査地点番号は、図-4の横断測線に示す調査地点に対応し、調査地点上の数値は、3季の地下水位調査結果の平均値を示す。

調査結果は、測線に沿って北西から南東に向けて平均地下水位が約 0.5m 高くなる傾向がみられる。地下水位

面の深さは、どの地点も地表より約 1.0m であった。水路に最も近い調査地点④の地下水位は、水路より離れた地点の水位とほぼ同じレベルであった。液状化地点である A 地点に近い水路内の水位は、8 月調査時は 4 月調査時に比べて 0.5m 高い状態であったが、④の地下水位の変化は小さく水路内の水位と地下水位の相関は見られなかった。この調査結果から、水路に直交する横断方向において水路近傍の地下水位は高い傾向は見られず、水位変動も小さい。水路近傍の地下水位は、周辺地域より高い傾向は認められなかったことから、水路近傍で液状化が発生した主たる要因ではない。

5. 微地形と液状化要因の関係

(1) 調査範囲周辺の微地形特性

調査範囲の微地形特性を把握するため、調査範囲周辺のDEM5mメッシュデータ³⁰⁾をもとに地盤高分布図を作成し、図-13に示す。調査地点を設定した付近で、水路に直交する方向の横断面図(地形変化を強調するため縦軸を横軸の100倍で表示、地盤高読み取り間隔20mピッチ)を、北東から I 断面(B地点付近)、II 断面(A-C)、III 断面(D,E-F)として図-14に示す。同図には図-4、5に示す調査地点の水路との横断的位置関係を示している。調査範囲周辺における自然堤防の横断地形は、いずれの断面で

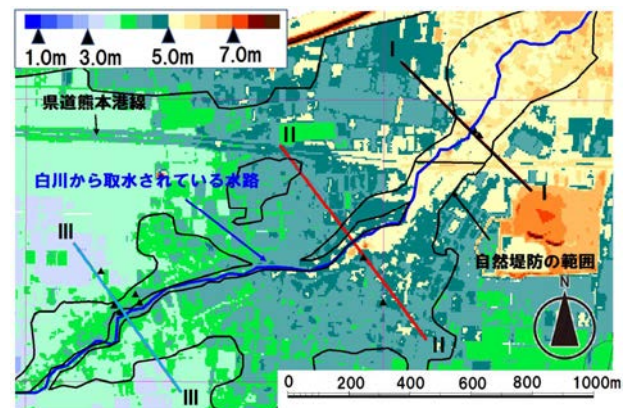


図-13 調査範囲周辺における地盤高分布と横断面図位置

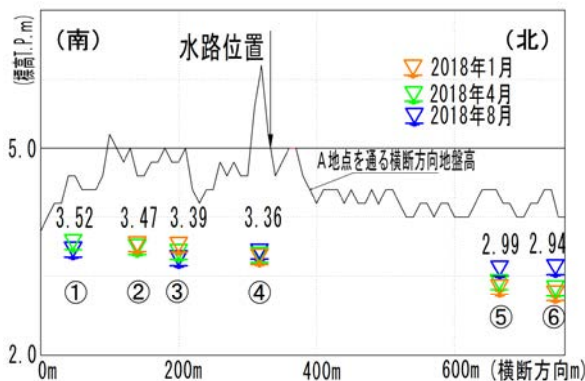


図-12 A地点を通る横断方向における地下水位調査結果

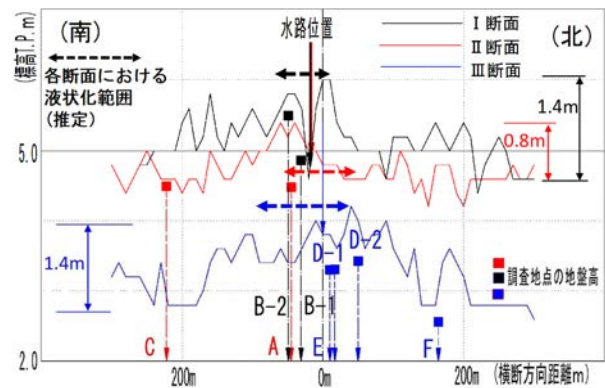


図-14 調査範囲周辺における各調査地点を含む横断面図

も凸状の尾根地形を示している。液状化が近傍で発生している幹線水路は、その尾根の頂部付近に位置している。液状化は、図-1より推定すると幹線水路の南側を中心に幅70～120mの範囲で発生している。

既往の文献資料¹⁹⁾により、現在の十八口堰付近から分派した派川の存在が江戸時代前期頃から明らかになっている。調査範囲の自然堤防は、現在の幹線水路の起源と推定される派川によって形成されたと考えられる。洪水時に白川からの土砂が堤内側に流入し、派川周辺の両岸に堆積して堤防地形を形成するとともに、洪水の度に堤内側に自然堤防が延伸して発達したと推定される。自然堤防の横断地形から派川も本川と同様の天井川であったと推察される。

(2) 液状化発生地点の地盤特性と微地形の関係

調査範囲の自然堤防および旧河道における液状化発生地点の N 値の重ね合わせた結果を図-15に示す。各液状化発生地点の地下水位以深の N 値は、旧河道のE地点を除き N 値5～7を示し、粒度組成はD地点を除き細砂およびシルト質砂である。また、A地点およびE地点で採取した噴砂の粒度組成も類似している。液状化発生地点の地質想定縦断図を図-16に示す。自然堤防の縦断勾配に沿って、地表より1.0～1.5mの位置から液状化層と想定される砂質土が連続して分布しており、拘束圧の条件もほぼ同じである。これより、液状化発生地点は、自然堤防および旧河道の微地形区分によらず、同じ地盤特性を示すと考えられる。

D、E地点が旧河道であることから、液状化発生地点は、過去の派川の位置と推定される。A地点より白川側の自然堤防において液状化が発生している地点も、D、E地点と同様に過去の派川の位置と推定される。白川本川に近い自然堤防では、本川からの流入土砂による堆積で河道地形が埋没したものと考えられる。図-13のT.P. 5.0mの等高線が水路沿いにA地点付近まで舌状に伸びていることから堆積状況が推察される。自然堤防の現況水路付近には潜在的に旧河道が分布していると考えられる。また、調査範囲の自然堤防内で確認されているD、E地点付近の旧河道は、自然堤防の発達過程の変遷を示す地形と考えられる。

自然堤防において、本調査のように旧河道が確認される場合や、文献調査において旧流路の存在が確認される場合は、微地形区分では把握できない旧河道の埋没地形が存在している可能性が考えられる。微地形区分を適用した今後の検討では、このような埋没地形の存在を想定した調査、分析が重要になると考えられる。

自然堤防における液状化の可能性を示す指標として、自然堤防の後背湿地との比高が提案されている。中埜³⁰⁾によれば5mを境に液状化する可能性をランク分けし、

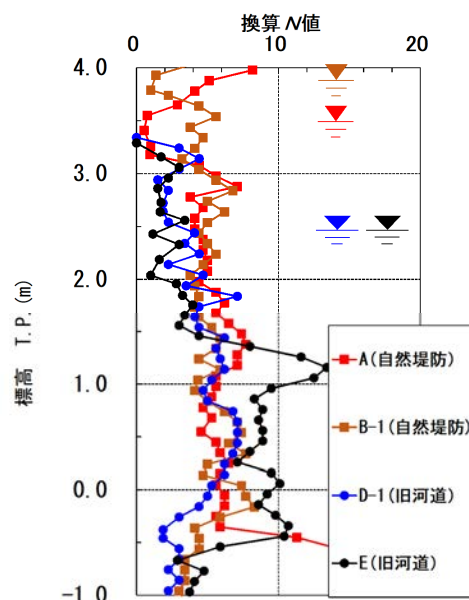


図-15 自然堤防および旧河道における液状化地点の N 値特性

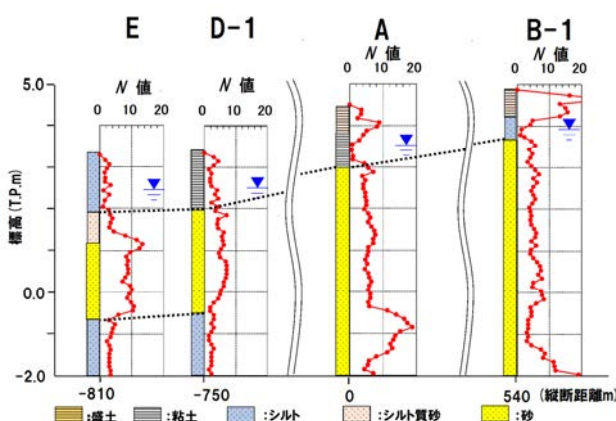


図-16 液状化発生地点の地質縦断想定図

(A地点を基準とし自然堤防上流側を正とする)

5mより低い場合は「液状化の可能性が大きい」としている。調査範囲の自然堤防の比高は図-15より0.8～1.4mの範囲であり、この評価に該当する。また、自然堤防における液状化の可能性が高いケースとして、発達が微弱的な自然堤防や辺縁部での発生¹⁹⁾が指摘されている。調査範囲の自然堤防は、小規模な派川で形成されたと想定されるが地形は比較的明瞭であり微弱ではないと判断される。また、液状化発生地点も辺縁部でなく、比高の高い部位で発生している。自然堤防を形成した流路の位置により、自然堤防における液状化の発生が一般的な傾向と異なることが明らかになった。

(3) 微地形と地盤材料の関係

調査地点における粒度組成より、旧河道を含む自然堤防の大半の地点で、液状化、非液状化地点を問わず地盤材料にシルトが含まれている。液状化発生地点でも液状化判定の指標³⁰⁾とされる F_c が35%を超える地点がある。 F_c が35%を超える地点の塑性指数 I_p は N_p で非塑性を示し

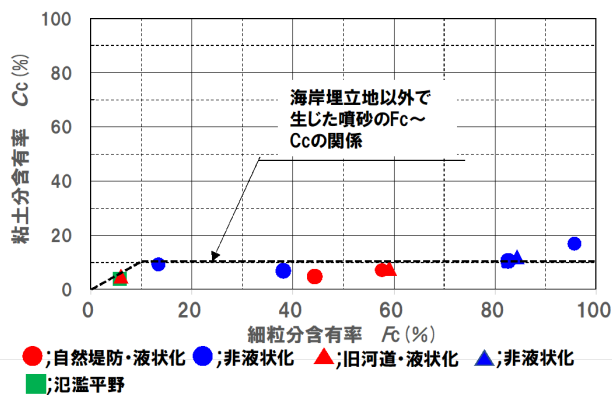


図-17 調査地点試料の細粒分含有率と粘土分含有率の関係³⁰⁾

ている。既往調査報告¹²⁾³⁰⁾でも噴砂に火山灰質土が含まれることが示唆されており、調査範囲の自然堤防の形成過程から地盤材料に火山灰質土が含まれることは明らかである。

調査地点の粒度試験結果より、各調査地点の F_c と粘土分含有率 C_c の関係を整理して図-17 に示す。 F_c に対する粘土分含有率は、大半が 10%以下を示している。この傾向は複数の地震における噴砂の粒度組成を分析した沼田ら³⁰⁾が示した海岸埋立地以外で生じた噴砂の粒度組成と近似している。D-1 地点と白川の堆積作用を受けていない氾濫平野の F 地点を除けば、自然堤防の表層地盤は、噴砂の粒度組成と類似した非塑性シルトが広く堆積している。非塑性シルトは、通常のシルトに比べて液状化強度が低い³⁴⁾との報告があり、液状化要因との関連性が考えられる。本稿では、詳細に言及しないが、調査範

囲における液状化の発生に關係する地盤材料の有無に留意する必要性が考えられる。

(4) 微地形と非液状化地点、粒度組成との関係

非液状化地点である自然堤防の C 地点および液状化範囲の境界部である B-2、D-2 地点において、液状化しなかった要因について考察する。

水路より約 200m 離れた自然堤防に位置する C 地点は、シルトが多い。一般に自然堤防の形成過程において横断方向の掃流力が減少することで地盤材料が細粒化する³⁵⁾ことが知られている。そこで、自然堤防の調査地点における粒度組成をもとに、現況の水路位置を基準とし、水路位置から調査地点までの横断方向距離と各調査地点における F_c および D_{50} との関係を図-18 に示す。 F_c および平均粒径 D_{50} を指標とした理由は、 F_c が液状化判定における粒度の指標として用いられていること、 D_{50} が粒度組成における平均的な粒径を表す代表的な指標とされていることである。既往文献³⁰⁾の調査結果をもとに図化した自然堤防として国内有数の規模を示す渡川水系四万十川における D_{50} の横断分布を合わせて示す。四万十川と河川規模や土砂材料の違いはあるものの、自然堤防の横断方向において細粒化している傾向が見られる。自然堤防で水路から離れた位置で細粒化している理由は、自然堤防の形成過程における横断方向の土質の細粒化によるものと考えられる。

液状化発生範囲の境界部における B、D 地点では、非液状化地点の N 値が近接する液状化発生地点より大きい傾向を示す。これらの非液状化地点は、液状化発生範囲の境界部に位置し過去の派川における河岸付近にであったことが想定される。これより、派川内で攪乱の影響を受ける液状化発生地点に比べて堆積環境が安定していた可能性が考えられる。

6. まとめ

本研究では、熊本市南区周辺において限定的に帯状の液状化が発生した自然堤防を対象として、微地形の地形・地盤特性や形成過程に着目し、液状化発生要因との関係について考察した結果、以下の知見を得た。

- 1) 調査範囲に分布する自然堤防は、過去の白川の派川が洪水時に流送した河床材料で形成されたと考えられる。自然堤防は、派川の一部と想定される現在の水路付近を頂部とする尾根状の地形を示している。
- 2) 液状化発生地点は、地形区分によらず N 値 5-7 の緩い細砂が主体の地盤材料であり、過去の白川の派川が存在していた旧河道に位置していると考えられる。

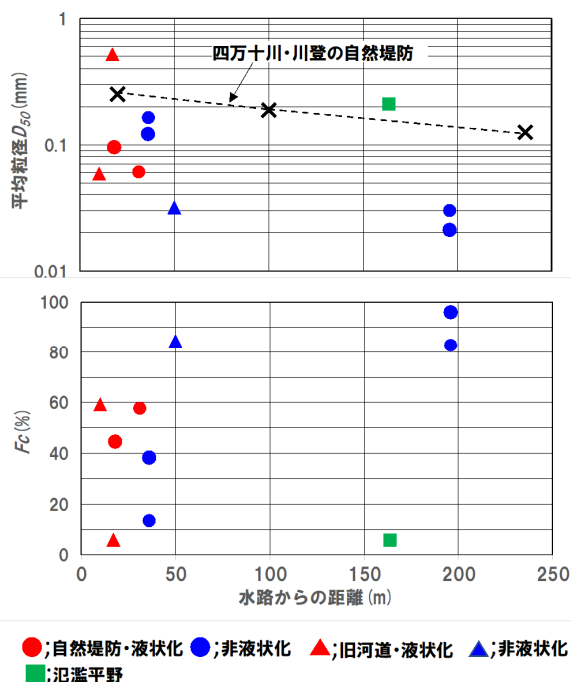


図-18 水路からの離れと F_c および平均粒径 D_{50} との関係

- 3) 白川本川に近い自然堤防の現況水路付近の範囲は、本川からの土砂流入・堆積により派川の河道地形が埋没し、旧河道地形が潜在的に分布しているものと考えられる。微地形区分を適用した検討では、微地形区分のみでは把握できない地形の変遷を想定し、液状化の可能性の高い地形の存在に留意することが重要である。
- 4) 自然堤防の水路から離れた位置で液状が発生しなかった要因は、自然堤防の形成過程において横断方向に地盤材料が細粒化する傾向によるものと考えられる。
- 5) 同一の自然堤防と判定された範囲において液状化の発生状況が異なった要因は、自然堤防の形成過程において、微地形区分では把握できない潜在的な旧河道が存在していたことが主因と考えられる。
- 6) 調査範囲では、表層地盤において噴砂の粒度組成に類似した液状化発生との関連性が示唆される非塑性シルトが確認されている。これより調査範囲において液状化に関係する特徴的な地盤材料の有無について留意することが必要である。

本研究は、阿蘇カルデラを流域に有する白川の沿川で限定的に液状化が発生した範囲を対象として行ったものであり、調査範囲や河川特性との関係が限定されている課題がある。

熊本地震の場合、白川が火山の影響を受けていることから、その河川特性に特徴があり、河川の堆積作用により形成される微地形の地形・地盤特性と液状化の関係性が顕著に表れた事例といえる。本研究では、微地形の分布を考慮した領域を対象に、詳細な地形情報による分析、文献記録など複数の地形情報と、液状化要因に関する現地調査を組み合わせることで対象範囲の地盤特性と液状化の発生要因との関係を明らかにした。これにより微地形区分のみでは把握できない情報を補間することで今後の予測に適用できることを示した。今後は、本研究における手法の有用性を他河川においても検証していきたいと考えている。

謝辞：熊本市南区砂原町周辺における現地調査、原位置試験および室内試験では、高知大学地盤防災学研究室に所属していた田所祐里香氏(現・日特建設)、棚谷南海男氏(現・エイト日本技術開発)、林聖淳氏(現・五洋建設)、中山優里香氏(現・JA 高知)、芳本健太氏、西村大輝氏の協力を得た。GISを使用したとりまとめでは(株)第一コンサルタンツの長崎悟史氏に指導をいただいた。熊本市南区砂原町周辺の現地調査に協力いただき、原位置試験の実施において快く調査場所として自宅敷地を提供していただいた地元住民の方々に記してお礼を申

し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会：地震被害調査シリーズ No.1 2016年熊本地震被害調査報告書, 2017.
- 2) 地盤工学会：平成 28 年熊本地震地盤災害調査報告書, 2017.
- 3) 若松加寿江, 先名重樹, 小澤京子:平成 28 年(2016)熊本地震による液状化発生の特性, 日本地震工学会論文集 第 17 巻, 第 4 号, pp.81-100, 2017.
- 4) 朝日新聞社：朝日新聞 2016 年 5 月 4 日朝刊 1 面
- 5) 国土交通省関東地方整備局, 地盤工学会：東北地方太平洋沖地震における関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書, 2011.
- 6) 大矢雅彦編:地形分類の手法と展開, 古今書院, 1983
- 7) 岩崎敏男, 常田賢一, 安田進, 佐藤弘行：液状化履歴地点における地形・地質の特徴, 第 17 回土質工学研究発表会発表講演集, 1982.
- 8) Kotoda, K., Wakamatsu, K., and Oya, M.: Mapping Liquefaction Potential Based on Geomorphological Land Classification, Proc., 9th World Conf. Earthquake Engineering, Tokyo, Vol.3, 1988.
- 9) 若松加寿江：日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版, 2011.
- 10) 安田進：液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1988.
- 11) 国土庁防災局震災対策課：液状化地域ゾーニングマニュアル(平成 10 年度改訂版), 1999.
- 12) 若松加寿江, 松岡昌志:全国を網羅した地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 第 3 回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」予稿集. 2009, pp15-20.
- 13) 国土交通省：ハザードマップポータルサイト, <https://disaportal.gsi.go.jp/>
- 14) 熊本市ホームページ:液状化ハザードマップ. https://www.city.kumamoto.jp/hpkiji/pub/detail.aspx?c_id=5&id=2121
- 15) 国土交通省：リスクコミュニケーションを考慮した液状化危険度評価技術の開発, http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/h29/170725_04jizen.pdf
- 16) 小荒井衛, 中埜貴元, 宇根寛：液状化リスク評価のための液状化被害と地形との関係性, 地学雑誌, *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 127(3), 2018.
- 17) 安田進, 石田栄介, 細川直行：液状化のハザードマップにおける作成方法の現状と今後のあり方, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1 (地震工学論文集第 30 巻), 2009.

- 18) 新熊本市史編纂委員会:新熊本市史第1巻, 72p,1998.
- 19) 国土交通省熊本河川国道事務所:白川水系河川整備計画書,2002.
- 20) 籠瀬良明:自然堤防の諸類型〜河岸平野と水害〜, 古今書院, 1990.
- 21) 原忠, 田所祐理佳, 中澤博志, 竹澤請一郎, 中根久幸:平成28年熊本地震で被災した液状化地盤の特徴, 日本地震工学会 全国大会-2016,2016.
- 22) 北澤聖司, 原忠, 中島昇, 柴原隆, 中山優里香:熊本地震における液状化地盤の特性(その1-3), 地盤工学会四国支部平成30年度技術研究発表会, 2018.
- 23) 北澤聖司, 原忠, 中島昇, 柴原隆, 中山優里香:微地形の形成過程と地形・地質特性に着目した液状化発生要因の分析, 第54回地盤工学会研究発表会, 2019.
- 24) 国土地理院:地理院地図 <https://maps.gsi.go.jp>
- 25) 地盤工学会:地盤調査の方法と解説, 第6編 サウンディング, 第3章 簡易動的コーン貫入試験, 2013.
- 26) 木下博久他:表層未固結堆積物を対象としたサンプラー・「ハンディージオスライサー」の紹介,平成29年度地盤工学会四国支部技術研究発表会,2017.
- 27) 地盤工学会(九州支部):九州地盤情報共有データベース, 熊本県, 2005,2012.
- 28) 岡田勝也, 杉本友康, 村石尚, 野口達雄:盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験の相関性, 土と基礎, Vol.40, No.4,pp11-16,1992.
- 29) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 2012.
- 30) 国土地理院:基盤地図情報(数値標高データ), http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_demimage.html.
- 31) 中埜貴元:液状化ハザードマップ作成のための地形分類情報の効率の整備手法の開発, 土木学会論文集 No.722/III-61,2002.
- 32) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, 第V編耐震設計編, 2017.
- 33) 沼田淳紀, 森伸一郎:噴砂の粒度組成, 土木学会論文集 No.722/III-61,2002.
- 34) 江川拓也, 山梨高裕, 富澤幸一:火山灰質土の液状化特性に関する検討, 日本地震工学会論文集 第16巻, 第1号,2016.
- 35) 籠瀬良明:自然堤防・河岸平野の事例研究, 古今書院, 1975.

RELATIONSHIP BETWEEN THE MICROTOPOGRAPHY AND OCCURRENCE FACTOR OF LIQUEFACTION IN KUMAMOTO EARTHQUAKE

Masashi KITAZAWA, Tadashi HARA, Noboru NAKAJIMA, Ryu SHIBAHARA
And Shinjiro HAYASHI

After the Kumamoto earthquake of April 2016, local liquefaction was verified in the natural levee of Minami Ward, Kumamoto City. A natural levee is a microtopography that is highly prone to liquefaction. For the same range of microterrains, identifying the reasons why liquefaction occurs under different circumstances may enable deriving more accurate predictions of liquefaction in microterrains. The objective of this study was to investigate how the characteristics of and slight differences in microtopography impact the occurrence of liquefaction. To this end, this work focused on the area of Sunahara-cyou, Minami Ward, Kumamoto City, where different degrees of damage were observed within the same microterrain classification. A field survey and in-situ tests, including terrain analysis and soil penetration resistance tests, were carried out to examine the relationships between the formation processes of microterrains and factors responsible for liquefaction. The results showed that longitudinal topographic changes and formation processes within microterrains of the same range impacted the liquefaction factors.