

# 液状化で生じた砂脈と噴砂に関する一考察

沼田 淳紀<sup>1</sup>・森 伸一郎<sup>2</sup>・陶野 郁雄<sup>3</sup>・遠藤 邦彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 飛島建設株式会社 技術研究所主任研究員 (〒 270-0222 千葉県関宿町木間ヶ瀬 5472)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

<sup>3</sup>正会員 工博 国立環境研究所 地下環境研究室室長 (〒 305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>4</sup>理博 日本大学教授 文理学部応用地学教室 (〒 156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40)

地震によって液状化した地盤の土質特性などを知るために、液状化で生じた噴砂を採取して分析することがある。しかし、遺跡で発掘された液状化砂脈の観察により、砂脈内の粒度組成と液状化層のそれとは異なることが示され、これを根拠に噴砂を分析することの有効性を否定する意見も示されてきた。この相対する見解を検討するために、ここでは、2つの地震で生じた3つの液状化地点で実施されたトレンチ調査結果を基に、砂脈内の土の物理的性質、砂脈形成のメカニズム、砂脈と噴砂と液状化層の関係の考察を行った。この結果、砂脈内の土は分級され下方ほど粗くなり、液状化層や噴砂とは一致しないこと、また、砂脈内の土に比べ、噴砂は液状化層の粒度組成に類似することがわかった。

**Key Words :** *liquefaction, earthquake, physical properties, grain size, silt, sand, gravel, site investigation, trench, sand boil, sand dike*

## 1. はじめに

本論文は、液状化地点を地震後にトレンチ調査することで、液状化によって噴砂が生じるときに形成される砂脈内の土の物理的性質、砂脈形成のメカニズム、および、砂脈と噴砂と液状化層の関係について考察したものである。

液状化に関する研究は、1964年新潟地震以降活発に行われてきた。渡辺<sup>1)</sup>は、この地震直後に、「液状化は粒度と相対密度により判定されるべきものであろう」とし、液状化しやすい粒度組成を示した。その後、新潟地震以降の地震による経験と研究が加えられ、現在の設計方法<sup>2),3),4)</sup>が示されているが、現在も、地盤の液状化を評価するうえで、粒度組成が重要な要素である。

渡辺<sup>1)</sup>は、液状化しやすい粒度組成として、パイプフローテーション工法に有効な粒度組成の範囲を液状化しやすい粒度範囲として示した。それ以降は、主に、液状化によって生じた噴砂<sup>5),6)</sup>や、ボーリングデータ、不攪乱サンプリングなどの地盤データによって求められた粒度組成が液状化検討に用いられてきた。特に、1978年宮城県沖地震では、

粒度組成の堆積学的性質を利用して噴砂の粒度組成より液状化した層の推定が行われ<sup>7)</sup>、また、1987年千葉県東方沖地震では、シルトを多く含む噴砂が多く、の地点で確認された<sup>8),9)</sup>ことからシルト質砂の液状化についてもその後関心が高まるようになった。

しかし、このような噴砂の研究に対し、噴砂と液状化層の粒度組成の同一性については、①噴砂は噴出し堆積する過程で淘汰されると考えられる<sup>9)</sup>、②遺跡で発掘された砂脈の観察結果では砂脈内の粒度組成と液状化層の粒度組成とは異なる<sup>10)</sup>という理由から、噴砂は液状化層の性質を反映しないとの反論も示され、液状化層の粒度組成を推定する上で、噴砂の適用性が明確になっているわけではない。

そこでここでは、主に上記の②について検討することを目的に、1993年北海道南西沖地震で液状化の生じた後志利別川下流の沖積地盤、および、1995年兵庫県南部地震で液状化の生じた兵庫県灘区の海岸埋立地盤のそれぞれの液状化地点で行われたトレンチ調査<sup>11),12),13)</sup>において、トレンチの断面観察と壁面より採取した土より、砂脈の物理的性質、砂脈形成のメカニズム、および、砂脈と噴砂と液状化層の関係の考察を行った。

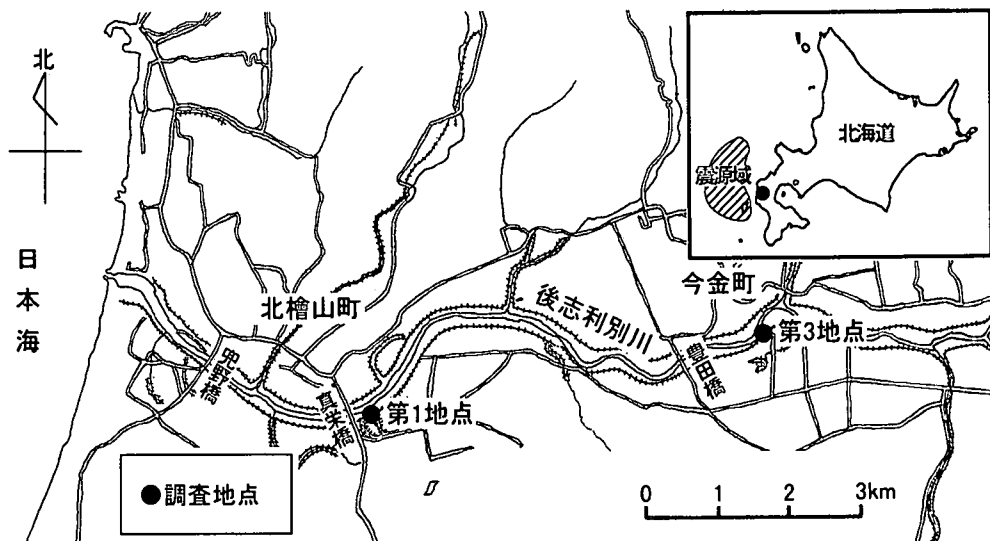


図-1 1993年北海道南西沖地震で液状化が生じた後志利別川下流域でのトレンチ調査位置図

なお、ここでは、地震の液状化によって地表に噴出した土を「噴砂」、地盤内における噴砂の運搬経路となり地震後液状化した土で充填されて形成される痕跡を「砂脈」と呼ぶこととする。噴砂や砂脈には、細粒分の卓越するものや礫を多く含むものもあるが、これらも含めて「噴砂」および「砂脈」と呼ぶこととする。

## 2. 1993年北海道南西沖地震における液状化地点のトレンチ調査<sup>11),12)</sup>

### (1)地震概要と調査地周辺の被害状況

1993年7月12日に、北海道南西沖の北緯42.78度、東経139.20度、深さ34kmを震源とするマグニチュード7.8の北海道南西沖地震が発生した。この地震で、震央距離約70kmに位置する北海道南西部の後志利別（シリベシトシベツ）川下流域では、沖積地盤の旧河道と河川の氾濫原で広範囲に液状化が発生し、堤防はいたるところで天端が2m以上沈下する被害が生じた<sup>11)</sup>。

### (2)調査方法と調査地点の位置と地盤

調査地点としては、地震後に撮影された航空写真に基づき、後志利別川下流域において亀裂と噴砂が確認された2地点が選定され、1996年と1997年に調査が行われた<sup>12)</sup>。

図-1に調査地点を示す。調査地点は、2地点とも北海道渡島半島から日本海へ流れる後志利別川下流左岸の堤外地である。後志利別川下流域の表層付近の地盤は、縄文海進（今から約5000～7000年前）

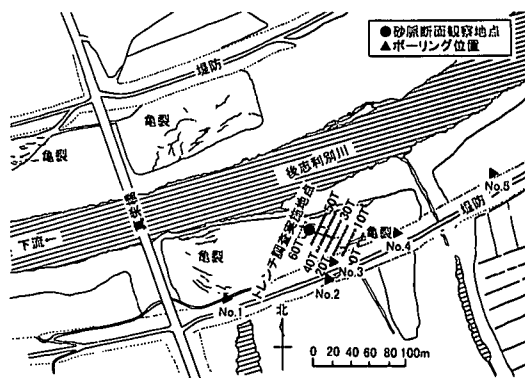


図-2 第1地点のトレンチ調査位置図

以降、河成作用を活発にし、現低地の河川地形にも認められる蛇行を数千年前から数百年前まで繰り返して形成されたと考えられている<sup>12)</sup>。これらの地域では、地震直後に液状化による亀裂および噴砂が現地調査<sup>15),16)</sup>や航空写真で確認されているが、調査地点はその後1m程度の盛土が行われていたため、調査実施時には周辺で噴砂の確認はできなかった。

2地点の地下水位は、ほぼ河川水位と同程度である。トレンチ調査時の排水は、釜場に小型ポンプを用いて簡易な排水を行ったのみで、トレンチの掘削はほぼ地下水位に達した時点で調査が不可能となるので、調査時点の地下水位は概ねトレンチ底面に等しい。なお、掘削中に地下水が勢い良く噴き出すことはなかったので、問題となるような被圧地下水は存在しないと考えられる。

#### a)第1地点

図-2に第1地点のトレンチ調査位置図を示す。図

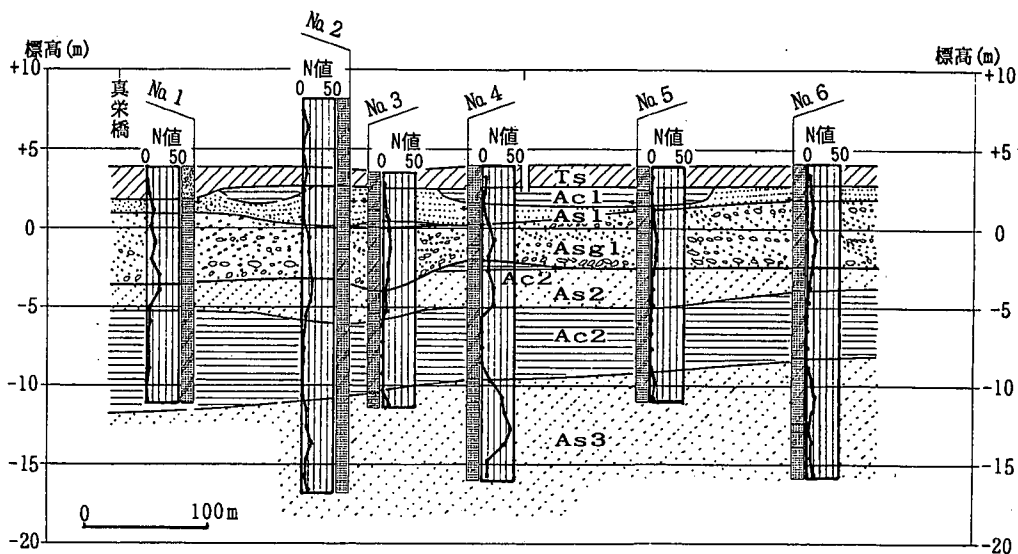


図-3 第1地点近傍の地質断面図(文献12)に加筆修正)

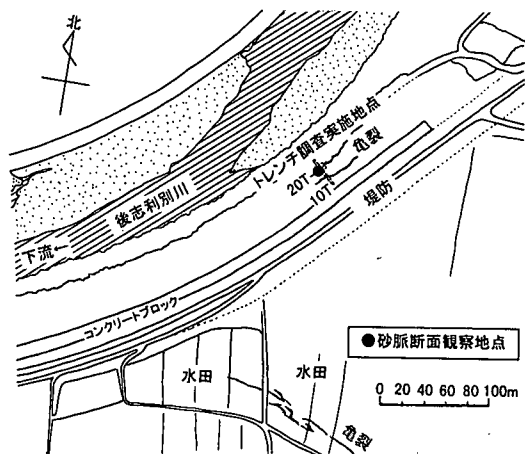


図-4 第3地点のトレンチ調査位置図

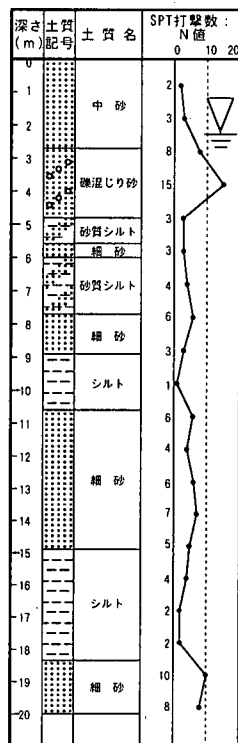


図-5 第3地点近傍のボーリング柱状図

中には、地震後に撮影された航空写真より読み取った亀裂も示した。調査では、亀裂を横断するように図中に点線で示す7ヶ所(0T, 10T, ..., 60T)でトレンチが掘削された。

図-3に石綿ら<sup>12)</sup>が作成した第1地点近傍の地質断面図を示す。ボーリング位置は、図-2に併記した。盛土下部には、N値が5程度以下の緩いシルト質細砂層(As1層)、および、N値が10以下の緩い礫混じり粗砂層(Asg1層)が連続して分布し、部分的に旧河道部に有機質シルト層(Ac1層)が分布している。その下には、シルト混じり細砂層(As2層)が不整合に重なり、さらにその下にはN値が2以下の軟弱な海成粘性土層(Ac2層)が分布する。

#### b)第3地点

図-4に第3地点のトレンチ調査位置図を示す。なお、第2地点は、掘削を行ったが砂脈を確認できなかったため、本論文では割愛した。図-5に、第3地点より約400m下流の左岸堤防付近のボーリング柱状図を示す。表層にN値が5以下の中砂層があり、

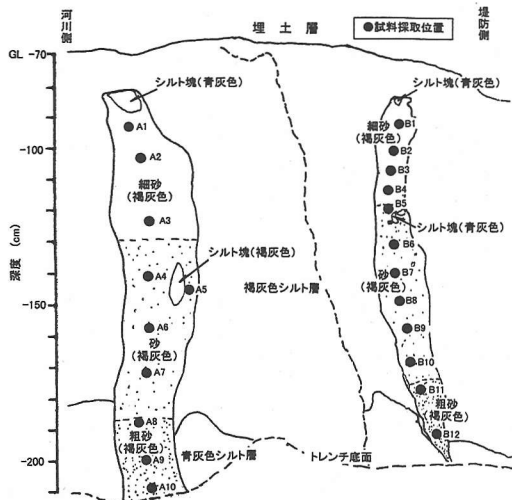


図-6 第1地点で確認された砂脈の鉛直断面スケッチ

その下に N 値が 8 ～ 15 の礫混じり砂層、N 値が 5 以下の砂質シルト層が存在し、概ね図-3に示した第 1 地点と同じ層序となっている。礫混じり砂層は、図および以降の記述ではボーリング柱状図に従いこのように表記するが、現地掘削調査での目視観察や粒度試験結果によれば、粗砂や細礫をマトリクスとするが、明らかに礫層であった。また、この礫層上部 50cm を掘削した感触では非常に緩かった。

### (3)砂脈の断面観察

#### a)第1地点

図-6に、1996年に第1地点で確認された2本の砂脈の鉛直断面スケッチを示す。断面スケッチを行った観察地点は、図-2に示した。図-3によると、液状化の可能性の高い層として N 値の低い As1 層と A<sub>sg1</sub> 層が考えられ、両層は場所によって層厚が大きく変化することがわかる。図-6に示される褐灰色および青灰色シルト層は Ac1 層に対応していると考えられる。As1 層は図中にはないが、第1地点の別のトレンチ調査より Ac1 層の下部に確認されている。この断面における砂脈上部は地表に到達せず、砂脈内の土の粒径は深さ約 1.2m の範囲でも明らかに下部が粗く上部へ行くほど細くなるように分級されていた。また、砂脈中には、地山の崩落によるシルト塊の僅かな混入が認められた。

砂脈が液状化によってできたことを立証するには、砂脈の充填材料がその供給源となる液状化層まで連続していることを確認することが最も確実な方法である。図では、砂脈下部が液状化層に到達していないが、同じトレンチの別の断面で、この砂脈の連続する部分が A<sub>sg1</sub> 層に到達していることが確認され

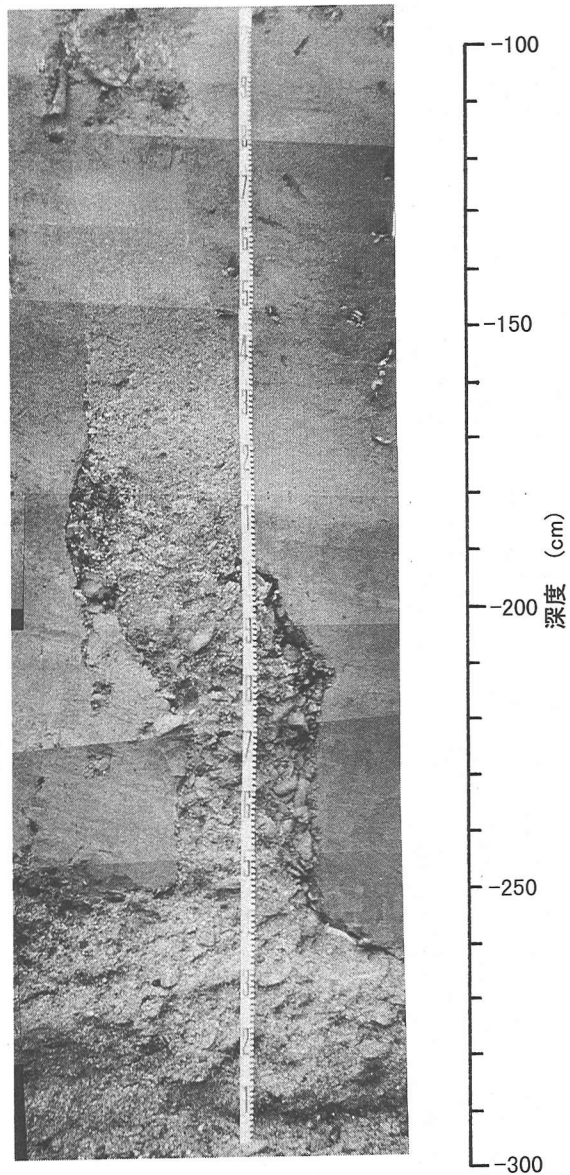


写真-1 第3地点で確認された砂脈の写真

た<sup>12)</sup>。また、第1地点の別のトレンチでは、Ac1 層や As1 層を貫く砂脈が多く確認され<sup>12)</sup>、この地点では礫混じり粗砂層の A<sub>sg1</sub> 層が液状化したことが明らかである。

#### b)第3地点

写真-1と図-7に、1996年に第3地点で確認された砂脈の鉛直断面の写真とスケッチを示す。断面の位置は、図-4に示した。図-5によると、液状化の可能性の高い層として、N 値の低い中砂層と礫混じり砂層が考えられるが、図-7に示される地点は、図-5に示されるボーリング地点とは異なり、礫混じり砂

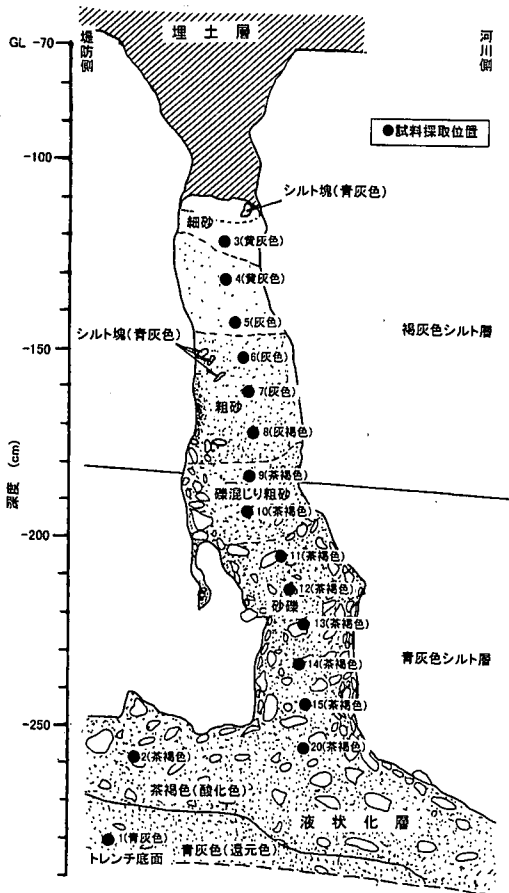


図-7 第3地点で確認された砂脈の鉛直断面スケッチ

層の上部に中砂層がなくシルト層が直接存在していた。旧河道部は液状化が生じやすいとされるが、第3地点も旧河道部である。このため、第1地点と同様に Ac1 層が地表近くに堆積し、図-7のシルト層は Ac1 層に対応すると考えられる。

一般に、砂礫地盤は透水性が高いことからこれまでは液状化しにくいと考えられてきたが、砂脈が礫層に到達しており、このような礫層が液状化したことが確認された。現地調査では、地下水位以下の掘削の際、瞬時に周辺から水が浸出したことから、礫層は透水係数が  $1 \times 10^{-2}$  cm/s 以上のオーダーの透水性の高い層だと推測される。

砂脈内の土は、第1地点の砂脈同様に分級され、上部へ行くほど粒径が細かくなっていた。

液状化層や砂脈内の礫は、摩耗の進んだためらから扁平な楕円礫が多かった。液状化層内では礫の長軸がほぼ水平に堆積していた、一方、砂脈内の特に基部では長軸が鉛直方向に堆積している傾向があった。これは、液状化層から砂脈を通り亀裂を上昇する流れがあったことを示している。さらに、液状化

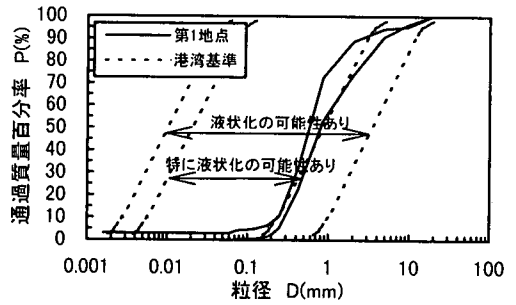


図-8 第1地点の液状化層上部の粒度組成

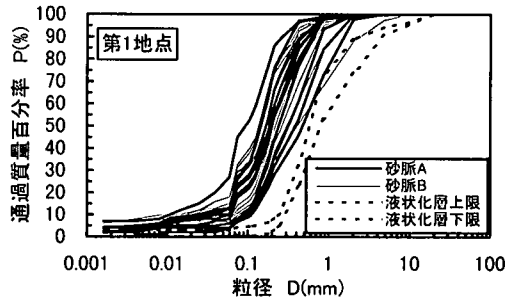


図-9 第1地点の砂脈内の粒度組成

層基部周辺の数 10cm の範囲では、長軸が砂脈方向を向く傾向があり、基部周辺で砂脈に向かう流れがあったものと推察される。また、大きな礫は、砂脈下部の屈曲部下の地山壁面近くに多く溜まっており、噴出の過程で、大きな礫が相対的に流速の遅い屈曲部や壁面付近に取り残されたことがわかる。したがって、礫の噴出には亀裂の幅や形状の影響も受けると考えられる。

液状化層は上部が茶褐色で下部が青灰色であり、地下水位は、この酸化・還元色の境界線より上で変動しているものと考えられる。シルト層中にも酸化・還元色の境界線が存在していたが、シルト層中での地下水位変動は、礫層中よりもはるかに緩慢になるので、この境界線は、地下水位変動の平均的な位置に近いものと考えられる。

#### (4)砂脈の物理的性質

##### a)第1地点

図-8に、第1地点の液状化層上部で採取した試料の粒度組成を示す。試料は、図-6に示した砂脈から平面的に 2~3m 程度離れた液状化層より採取した。採取された試料は、JIS A 1204 の方法に、0.212, 0.180, 0.125mm のふるいを追加し試験を実施した。図中には、液状化しやすい土の粒度組成の目安として、港湾基準<sup>4)</sup>に示される均等係数の大きい砂の場合の「液状化の可能性あり」と「特に液状化の可能

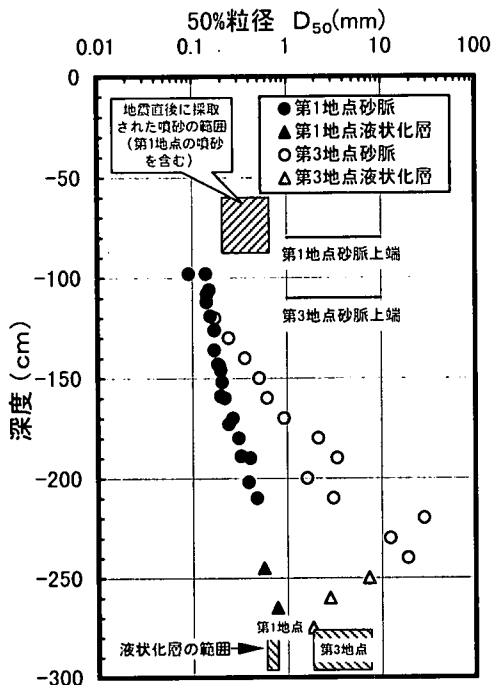


図-10 砂脈内の土の50%粒径の深度分布

性あり」の粒度組成の範囲を示した。

第1地点の液化化層の粒度組成は、港湾基準の「特に液化化の可能性あり」の範囲のほぼ上限にあり、最大粒径は20mmで礫分（粒径2.00mm以上の含有率）を20%程度含むことがわかる。

図-9に、第1地点で確認された砂脈内で採取された土の粒度組成を示す。採取位置は、図-6に示すように深さ方向に概ね10cmピッチである。図中点線は、図-8に示した液化化層で採取した試料の粒度組成の上限値と下限値である。

砂脈内の土は、いずれも均等粒径で、液化化層と比較すると細粒側にある。さらに、図では試料番号を省略したが、砂脈内では土粒子が砂脈の上部ほど細粒となるように分級されていた。

砂脈内の土は概ね均等粒径なために、50%粒径がそれぞれの粒度組成を代表していると考えられる。そこで、砂脈内の土粒子の粒度組成の変化を定量的に把握するために、図-10に砂脈内の土の50%粒径の深度分布を示す。図中には、液化化層と地震直後に後志利別川下流域で採取された噴砂の範囲、後述する第3地点の砂脈も併記した。

砂脈内では、50%粒径が砂脈の上部ほどなめらかに小さくなること、砂脈内の粒度組成は上部ほど液化化層から乖離することが特徴である。また、砂脈内では液化化層に比べどの深さでも50%粒径が小さくなっている。なお、第1地点では砂脈基部付近

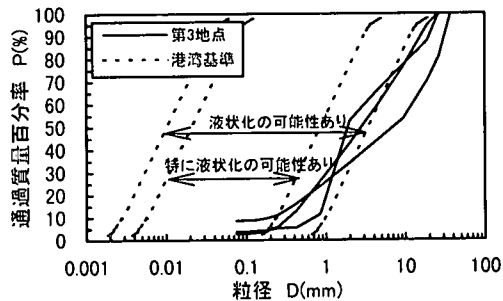


図-11 第3地点の液化化層上部の粒度組成

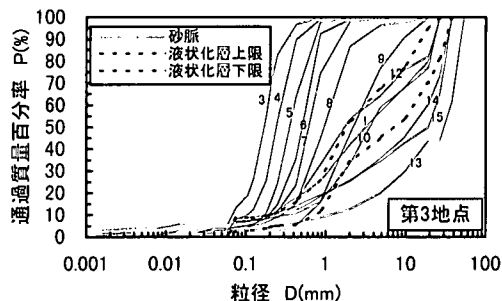


図-12 第3地点の砂脈内の粒度組成

に地下水位があったので、基部付近では試料を採取できなかった。

#### b)第3地点

図-11に、第3地点の液化化層で採取した試料の粒度組成を示す。試料は、図-7に示した1, 2, 20より採取した。第1地点よりも約6km上流に位置する第3地点の液化化層は、第1地点よりも粒径が粗く、「液化化の可能性あり」の上限付近にあり、最大粒径は40mmで礫分を50%以上も含み礫に分類される。ただし、この液化化層の礫は、前述のように摩耗の進んだためらかて扁平な楕円礫が多く、最大粒径とは短粒径を意味し、長径は最大で約130mm<sup>12)</sup>であった。液化化層の上にある水平方向に連続性のよい層はシルトであることから、液化化層の上方境界は非排水条件であったと考えられる。

図-12に、第3地点で確認された砂脈内で採取された土の粒度組成を示す。採取位置は、第1地点と同様深さ方向に概ね10cmピッチである。図中の点線は、図-11に示した液化化層の上限値と下限値である。砂脈内の土は、粒径が大きなものを除けばいずれも均等粒径である。液化化層と比較すると、細粒側にあるものと液化化層よりも礫分を多く含む部分がある。さらに、砂脈内の土は、砂脈の上部ほど細粒となるように分級されていることがわかる。

図-10に、第3地点の砂脈内の土の50%粒径の深度分布を併記した。第1地点と同様に、分級され

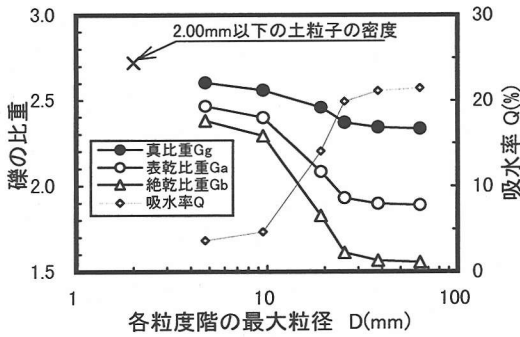


図-13 液状化層の礫の比重と吸水率

50%粒径が砂脈の上部ほどなめらかに小さくなること、液状化層とはほとんど異なることがわかる。加えて、第3地点の砂脈では、砂脈の上部で液状化層より小さく、下部で液状化層より50%粒径が大きくなっていることがわかる。

現地調査で、第1地点、第3地点ともに礫を持つとかなり軽い印象を受けた。そこで、第3地点の液状化層で採取した2mm以上の礫について、各粒度階ごとにJIS A 1110に準拠し礫の比重と吸水率を求めた。この結果を図-13に示す。同じ地点で採取した2mm以下の土粒子の密度は2.72であった。フィルグムの堤体材料などに使われる礫は、一般的には絶対比重が2.6程度で吸水率は5%以下であり、粒径が大きくなると絶対比重が大きくなり吸水率は小さくなる。ところが、ここで採取された礫は、表乾比重、絶対比重、真比重のいずれも粒径が大きくなるにしたがい、比重は小さくなり吸水率は大きくなることからわかる。大きな粒径では絶対比重が1.5程度で、吸水率は20%を越え、かなり多孔質であると考えられる。液状化した土中での礫の上昇のしやすさは、表乾比重に左右されると考えられるが、表乾比重は粒径10mm以上では2以下であり、通常の砂礫地盤と比較して礫の密度が小さく、液状化した土の中で礫が上昇しやすかったといえる。

#### (5)砂脈と噴砂の粒度組成の関連

図-14に、後志利別川下流域（主に豊田橋より下流）で地震後に採取された噴砂16試料<sup>16)17)</sup>の粒度組成を示す。この中には、第1地点のNo.1とNo.2のボーリング位置付近の亀裂からの噴砂3試料も含まれている。図中には第1地点と第3地点を併せた液状化層の粒度組成の上限値と下限値を点線で示した。噴砂の粒度組成は、液状化層よりも細粒側にあり、液状化層とは異なることがわかる。ただし、地震直後の現地調査では、第1地点で採取した噴砂中に長さ1～8cmの大きな円礫も散在していた。写真-2

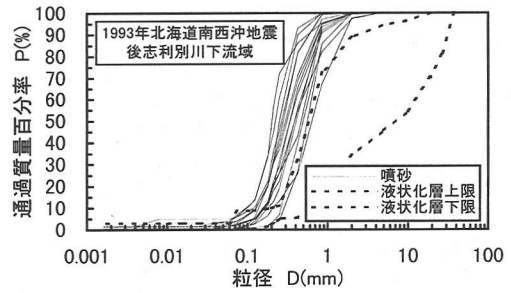


図-14 1993年北海道南西沖地震において後志利別川下流域で生じた噴砂の粒度組成(第1地点における噴砂を含む)



写真-2 第1地点で地震直後に採取した噴砂と噴砂中に散在していた円礫

に、地震直後に採取した第1地点の噴砂に含まれていた円礫を示す。

前述の図-10には、図-14に示した噴砂の50%粒径の範囲も示した。噴砂の50%粒径は、液状化層よりも細粒側にあり、噴出の過程で大きな粒径の土が取り残され相対的に細粒な土のみが主に噴出したものと考えられる。また、噴砂の50%粒径は、砂脈内で上部へ位置するほど小さくなるという関係とは連続しないことがわかる。「1.はじめに」で記述した砂脈内と液状化層の粒度組成が異なることをもって噴砂と液状化層の粒度組成の同一性を否定する意見は、砂脈内の土が分級され上部ほど細粒となるので、さらにその上に位置する地表に堆積する噴砂はこの分級に連続して細粒な土のみが堆積するというを指摘していると解釈できる。しかし、図-10に示した第1地点の事例は、分級が噴砂には連続せず、この意見が必ずしも妥当なものではないことを示している。

この事実を解釈する。噴砂は、液状化した土が砂脈を通して地表に噴出するとき、地震動の大きさ、

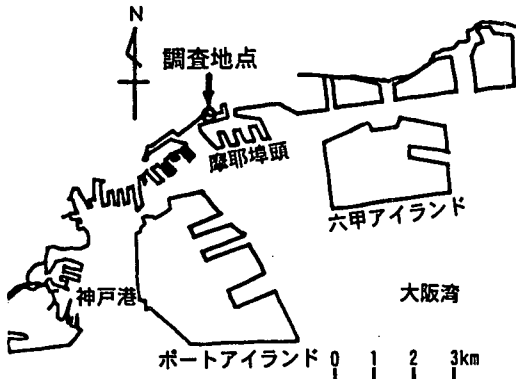


図-15 1995年兵庫県南部地震で液状化した神戸市でのトレンチ調査位置図

継続時間、噴出泥水流の速度、液状化層の体積、土粒子の密度、砂脈の幅・長さや形状などによって噴出できる土の限界の最大粒径が決まり、粗い土粒子は取り残され、それ以下の土粒子のみが地表に噴出すると考えられる。したがって、液状化層の最大粒径が小さいほど全粒径が地表に噴出する可能性が高く、また、最大粒径が大きな場合でも上記の条件次第で全粒径が地表に噴出すると考えられる。一方、砂脈内の土は、液状化した土の噴出の勢いが減衰し、最終的には一度上昇した地下水水位面が下がっていく過程で下部から粗い土粒子が順次堆積していくと考えられる。このような形成メカニズムの違いから、本質的に噴砂と砂脈内の粒度組成は異なり、両者の同一性の議論は有効でないと考えられる。したがって、砂脈内の粒度組成が液状化層と異なることが、噴砂の粒度組成と液状化層が一致しない理由とはならないといえる。

### 3. 1995年兵庫県南部地震における液状化地点のトレンチ調査<sup>(12),(13)</sup>

#### (1)地震概要と調査地周辺の被害概要

1995年1月17日に、淡路島北東部の北緯34.61度、東経135.00度、深さ14.3kmを震源とするマグニチュード7.2の兵庫県南部地震が発生した。この地震で、神戸から大阪にかけての大阪湾岸沿いの海岸埋立地のほぼ全域で液状化が生じ、震央距離約22.6kmの調査地点周辺では、岸壁が海側へ数メートルせり出す被害が生じた。

#### (2)調査地点の位置と地盤

トレンチ調査地点は、図-15に示す神戸市灘区西部の海岸埋立地である。この地点は、1935年(昭和10年)～1967年(昭和42年)の間<sup>(10)</sup>にまさ土

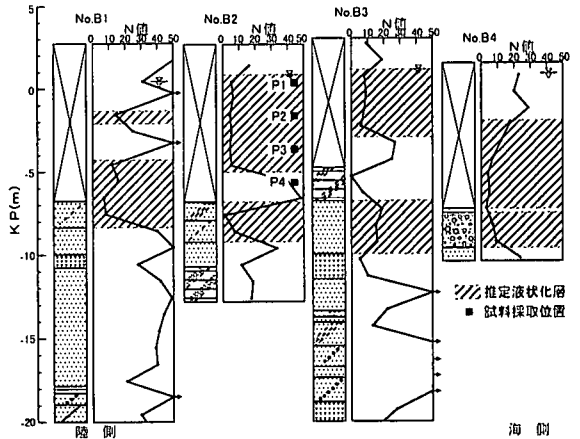


図-16 調査地点周辺のボーリング柱状図

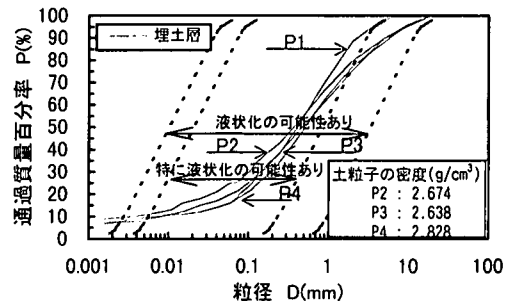


図-17 液状化したと推定される埋土層の粒度組成

を主体とし埋め立てられた。

調査地点から約150m以内のボーリング柱状図を図-16に示す。No.B4は、調査地点から最も近く約20mの距離にある。GL-10m程度までが中～粗砂を主体とした埋立土層であり、一部に礫、鈹滓、鉄片、煉瓦、石炭がら、アスファルトなどが含まれている。図中には地下水水位以下で、N値が20以下と低い埋立土層、砂層、砂礫層を推定液状化層として斜線で示した。これ以降、斜線で示した緩い埋立土層が液状化したものとして検討を行う。

図-17に、液状化したと推定される埋立土層の粒度組成と土粒子の密度を示した。試料の採取位置は、図-16に■印で示した。均等係数は100以上と大きく、細粒分含有率は18～27%、最大粒径は10～20mmである。目安のために、図中には港湾基準<sup>(4)</sup>に示される均等係数の大きい場合の液状化しやすい粒度組成の範囲を示した。「特に液状化の可能性あり」の範囲内にほぼ入っていることがわかる。

なお、採取試料が標準貫入試験によっているので、サンプラー内径35mmの制限を受けている。この点について、神戸市によるポートアイランドのまさ土埋立層における調査結果<sup>(10)</sup>によると、標準貫入試験の試料と掘削土砂の粒度組成は、粒径20mm以



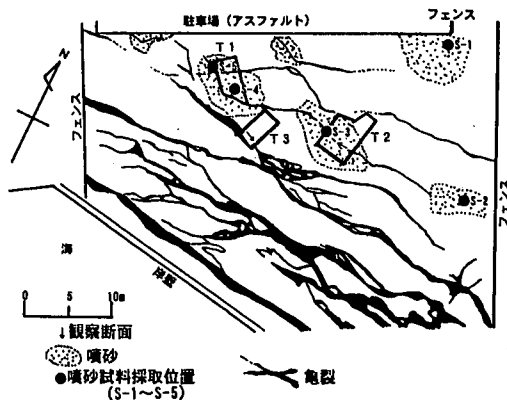


図-18 トレンチ調査位置と周辺の被害状況

上を除けば粒径 1mm 以下の細粒側の通過質量百分率は標準貫入試験の試料の方が 5 ~ 10%多い程度で傾向は概ね一致している。これを参考にすると、液状化したと推定される埋土層の粒度組成は、概ね図-17に示した粒度組成で代表されるものの、実際には図中の粒度組成よりやや最大粒径が大きく、細粒分が 5 ~ 10%程度少ないと考えられる。

なお、図-17に示した粒度組成は、まさ土によって埋め立てられたポートアイランドの埋土層の平均的な粒度組成<sup>19)</sup>とほぼ同様である。また、土粒子の密度も、ポートアイランドで採取されたまさ土が 2.65g/cm<sup>3</sup>であったので、ほぼ同様である。

### (3) トレンチ調査の方法

トレンチ調査は、地震から約 1 年経過後の 1996 年 3 月に実施した。図-18にトレンチ調査の位置を示す。図にはこの調査に基づき、亀裂状況、噴砂の分布状況も示した。これらの状況は、地震直後の航空写真でも確認できる。

トレンチの掘削は、図に示す T1 ~ T3 の 3 地点で行った。T1 と T3 はトレンチ面の一部が亀裂に沿うように、T2 は亀裂を横断するように掘削した。T1 と T2 地点には地表面に噴砂が堆積していたが、T3 地点には堆積していない。トレンチは深いところで 2.4m であり、液状化層と推定できる層も認められたが、明瞭には液状化層と断定できなかった。3 つのトレンチではいずれも表層に鉄屑層が厚さ 1.0 ~ 1.2m 程度あり、特に T1 と T3 の掘削にはブレーカーを必要とするほどの強度を持っていた。地下水位は、潮の干満の影響を直接受け、1 日に 1m 程度、概ね GL-1m から GL-2m の間を変化した。

調査は、現地でも周囲の状況、砂脈や亀裂の状況を観察した後、主に砂脈内の各位置で試料を採取して

物理的性質を求めた。

### (4) 調査地点の噴砂、亀裂、被害状況の観察

調査地点の南側に位置する岸壁は、海側へ傾斜するとともに約 3.2m (亀裂幅の累計) 海側へ移動し、岸壁の背後は海側ほど大きくなるような沈下が生じ、岸壁付近では 1m 以上沈下し水没していた。図-18に示されるように、背後地盤には岸壁に平行な亀裂が幾筋も生じていた。

噴砂は、岸壁付近では地表面に認められず、岸壁から 20m 以上離れた地点で認められた。図-18に示した海側に近い T3 地点の亀裂では、地表には噴砂が認められなかったが、亀裂内に砂脈が確認された。亀裂内に液状化層から供給された土が上昇してきても、地表面まで達しない場合があることが確認できた。これは、岸壁近傍では、過剰間隙水圧が上昇し始めても、岸壁が水平移動することで水圧が消散してしまうために過剰間隙水圧があまり上昇しないことや、噴出しようとする砂の供給量以上に亀裂容積が大きくなるために地表まで土が上昇しないためと考えられる。

この地点以外にも兵庫県南部地震では、多くの岸壁で大きな側方流動が生じ、岸壁から数 10m 以上離れた内陸側で噴砂が確認されても、岸壁近傍では噴砂が確認されない場所が多かった。これらは、このような理由によると考えられる。

### (5) 砂脈の観察

#### a) T2 トレンチ

T2 トレンチの西側鉛直断面で確認された砂脈を図-19に示す。T2 トレンチ西側鉛直断面は、地表面の噴砂丘のほぼ中心に位置し、最も噴出の勢いが激しかったと考えられる。図-19に示すように、砂脈は地表から GL-50cm 程度までは地表の噴砂と連続していた。その下から GL-110cm 程度までは、黄褐色、淡茶褐色の砂や礫が混ざって堆積していた。この部分は、周囲の地盤との境界も不明瞭で、周囲の土を巻き込んでいるように見えた。GL-60 ~ -80cm には空洞が見られ、GL-60cm の空洞の横には、亀裂の壁の崩落片である茶色の塊が認められた。GL-110 ~ -200cm は青灰色の砂で、堆積状況は連続的に変化し、GL-110cm 付近の土は細砂だが下方ほど粗くなっていた。この断面における砂脈内の堆積状況の観察から、下方より連続的に堆積していたのは GL-110cm 以深であり液状化層から連続すると考えられるが、それ以上は、亀裂内壁の崩落片や地表の噴砂もしくは他の部分からの供給による砂であると考えられる。以上の事実認識より、以降では

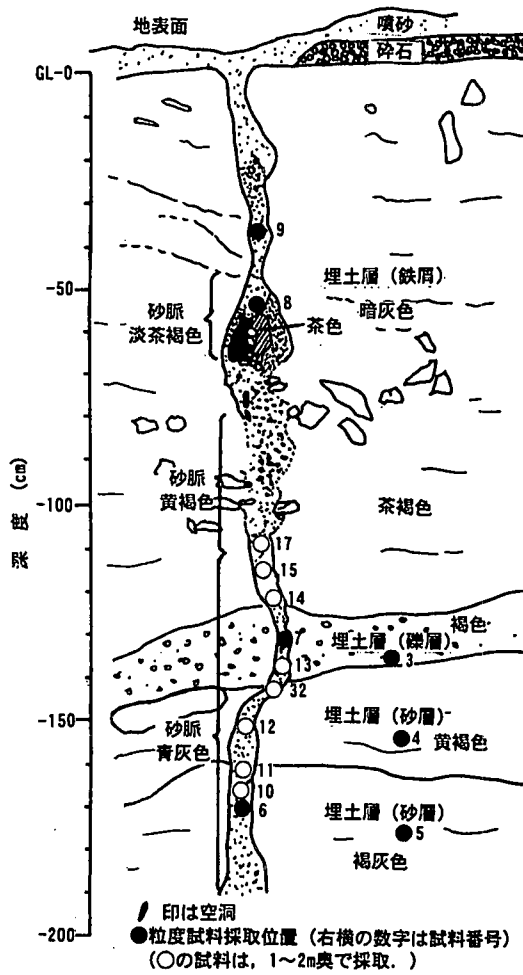


図-19 T2トレンチ西側鉛直断面の砂脈

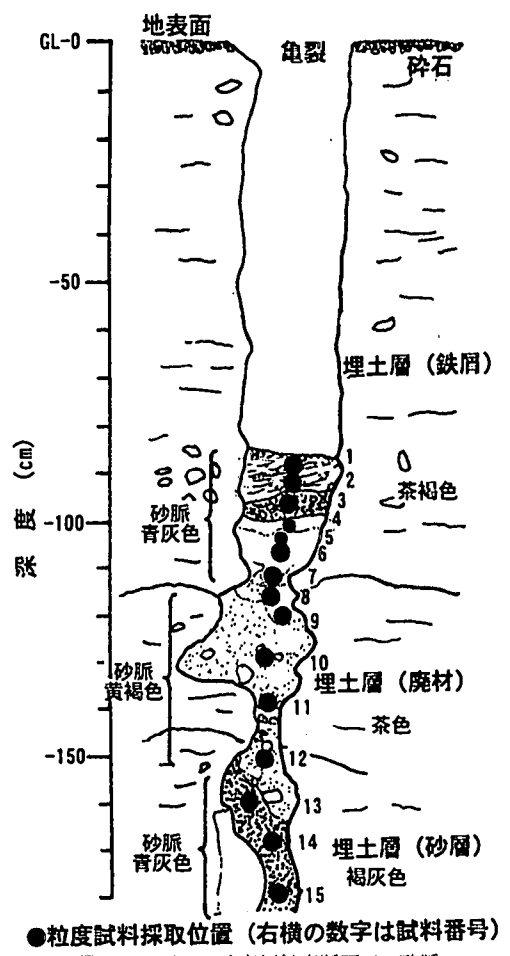


図-20 T3トレンチ東側鉛直断面での砂脈

・GL-110cm 以下を砂脈として考える。

b) T3トレンチ

図-20に T3 トレンチ東側断面で確認された砂脈を示す。砂脈は、上端面から 10cm の GL-95cm までにラミナが認められる部分があり、その下から GL-100cm 程度までに粗礫が堆積していた。この部分より上は、堆積の状況から地震後二次的に堆積したものである。その下には、上から粘土、シルト、砂と明らかに土粒子が分級された層があった。この深さまでは青灰色であるが、その下の GL-120cm 以深には黄褐色のまさ土質の砂層が GL-155cm 前後まであり、直径数 cm 程度の礫も認められた。さらにその下には青灰色の粗砂が堆積していた。このように、GL-120 ~ 150cm の黄褐色の層は色調が異なり、土の供給源が異なる可能性もある。

(6) 噴砂の粒度組成

図-21に、T1 ~ T3 トレンチ周辺で採取した噴砂

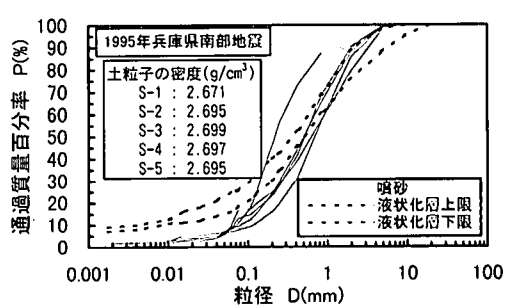


図-21 T1~T3トレンチ周辺で採取された噴砂の粒度組成

の粒度組成を示す。図中には、図-17に示した液状化したと推定される埋土層の粒度組成の範囲も点線で示した。噴砂の採取にあたっては、時間の経過を考慮し、風化の影響が考えられる噴砂丘の表層約 3cm 程度を取り除いてから採取した。

噴砂の粒度組成は、粒径 1mm 以上では推定液状化層とほぼ一致するが、それ以下の細粒側では埋土

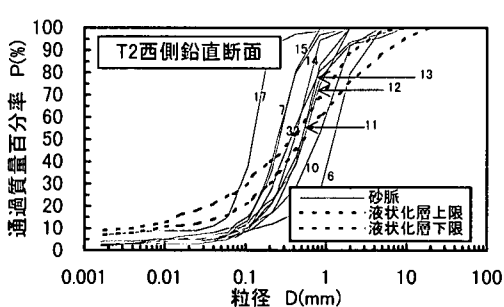


図-22 T2トレンチ西側鉛直断面砂脈内の粒度組成

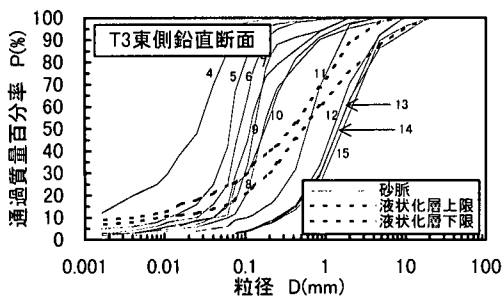


図-23 T3トレンチ東側鉛直断面砂脈内の粒度組成

層より通過質量百分率が10%程度の範囲で低い。しかしながら、標準貫入試験より得られた試料が、掘削して得られた材料に比べて5～10%程度細粒分が多くなることを考慮すると、噴砂と推定液状化層の粒度組成は良く一致していることがわかる。

噴砂の土粒子の密度は $2.67 \sim 2.70 \text{g/cm}^3$ で、埋立土層はP4を除けば $2.64 \sim 2.67 \text{g/cm}^3$ である。噴砂の方がやや大きめであるが、埋立土層に鉍滓や鉄片が含まればつきも多いことを考慮すると、ほぼ同程度であるといえる。

### (7)砂脈内の粒度組成

T2 および T3 トレンチの砂脈内の粒度組成を図-22、図-23に示す。それぞれの図中には、推定液状化層の粒度組成の範囲を併記した。各試料の採取地点は、図-19、図-20に示した。また、図中からは地震後二次的に堆積したと考えられる試料は除いた。

図-22、図-23に示すように、砂脈内の土はいずれも均等係数の小さい分級の進んだ粒度組成を示し、砂脈内の鉛直方向に土の分級がほぼ規則的に変化していることがわかる。砂脈内の土は、ほとんどの場合細粒分が少ないが、T3 トレンチの試料4は、観察においても粘土分が卓越し、粘土分含有率は液状化層と考えられる埋立土層の約2倍にも達した。

このような土の分級状態を把握するため、図-22、図-23に示した砂脈内の土の内、供給源が同一と考

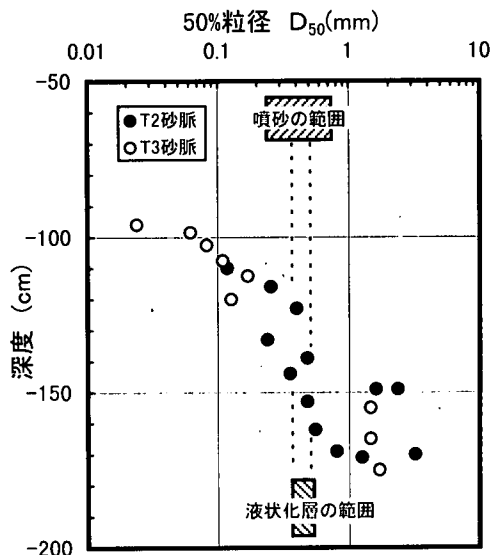


図-24 供給層が同一の砂脈内の土の50%粒径深度分布

えられる青灰色の土の50%粒径の深度分布を図-24に示す。T3 トレンチでの砂脈内の土は一部観察断面内で連続していないが、T2 トレンチでの土は、砂脈内の下方より連続的に堆積している。また、図中上部と下部には、それぞれ地表面に堆積した噴砂と液状化層と考えられる埋立土層の50%粒径の範囲を示した。噴砂と液状化層はほぼ一致するが、砂脈内の土は、土の供給源である液状化層と比べて、砂脈上部で細粒側に、砂脈下部で粗粒側になめらかに分級され、後志利別川の事例と同様に分級された粒径は噴砂に連続していないことがわかる。地震後のトレンチ調査では、液状化土の噴出現象の最終段階で堆積した状態<sup>20)</sup>の断面を観察していることになり、この段階では砂脈内の土には分級が認められ、粒度組成は液状化層とは異なることがわかった。

以上より、後志利別川の事例で前述したように、砂脈と噴砂では形成メカニズムが異なると考えられ、砂脈内の土は、液状化層の土が噴出した最終段階で粗粒な土ほど下部に細粒なものほど上部に堆積するので、液状化層の粒度組成とは本質的に異なる。一方、噴砂は、噴出時の条件により最大粒径の制限を受け液状化層よりも細粒な土が噴出する場合もあるが、条件が満足されれば液状化層の全粒径が地表に噴出し堆積し得ると考えられる。ここで扱った事例では、砂脈内の土に比べ噴砂の方が液状化層の粒度組成と類似することがわかった。このように噴砂と液状化層の粒度組成が類似した事例は、陶野<sup>21)</sup>が1984年日本海中部地震で50%粒径と均等係数を用いて示した事例、森ら<sup>22)</sup>が1993年北海道南西沖地震で示した事例などがあり、ここでの事例が特別な

事例ではないといえる。

#### 4. 結論

3つの液状化地点の亀裂に直行するトレンチ調査と、噴砂・砂脈・液状化層の土の粒度組成の検討を行い以下の結論を得た。

- (1) 1993年北海道南西沖地震では後志利別川下流域において、不透水性のシルト層に覆われた地盤で、最大粒径が40mm、礫分含有率が50%以上の透水性の高い礫層が液状化した。
- (2) 3つの液状化地点に共通して砂脈内の粒度組成は、上部ほど細粒に下部ほど粗粒になめらかに変化し、上部ほど液状化層の粒度組成から細粒側に乖離し、礫分を多く含む層が液状化した場合には、砂脈基部では液状化層よりも粗粒となる。砂脈内の土は、このように分級をともって堆積するために、その粒度組成は液状化層の粒度組成とは異なることがわかった。
- (3) 噴砂の粒度組成は、両者の形成メカニズムの違いから砂脈内の粒度組成とは関係がなく、液状化層に礫分を多く含む場合には液状化層の粒度組成と異なり細粒側となるが、噴出の条件によっては、液状化層の粒度組成に類似することがわかった。

**謝辞:** トレンチ調査は、北海道開発局今金河川事業所、今金町教育委員会の能條歩氏、北海道檜山北高等学校の日下哉先生、(株)神戸製鉄所に協力して戴いた。後志利別川下流域での調査結果については、基礎地盤コンサルタンツ(株)の石綿しげ子氏、道都大学短期大学部 鈴木正章助教授から多くの御意見を戴いた。現地調査では中央開発(株)中村裕昭氏(現在、地研コンサルタンツ)・似内徹氏、佐藤工業(株)の規矩大義氏に大変お世話になった。トレンチ調査や各種実験は、飛鳥建設(株)技術研究所の染谷昇氏と田口勝夫氏によるところが多い。これらの方々に、心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 渡辺 隆: 新潟地震におけるバイプロフローテーションの効果, 土と基礎, 13-2, pp.27-33, 1965.2.
- 2) 日本道路協会: 7.5 砂質地盤の液状化の判定, 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.91-95, 1996.12.
- 3) 日本建築学会: 4.5 節 地盤の液状化判定, 建築基礎構造設計指針, pp.163-169, 1988.1.
- 4) 日本港湾協会: 13 章 砂質土の液状化, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版(上巻), pp.203-209, 1989.6.
- 5) 土質工学会地震調査委員会: 1968年十勝沖地震による

- 地盤震害調査概報, 土と基礎, 16-9, pp.5-17, 1968.9.
- 6) 土質工学会シラス研究委員会: えびの地震と地盤災害, 土と基礎, 16-9, pp.47-59, 1968.9.
- 7) Tohno, I. and Yasuda, S.: Liquefaction of the ground during the 1978 Miyagiken-oki earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.3, 1981.9.
- 8) 森 伸一郎, 沼田 淳紀, 境野 典夫, 長谷川 昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, 39-2(397), pp.17-22, 1991.2.
- 9) 吉見 吉昭: 浅埋土の粒度・塑性特性と液状化抵抗, 土と基礎, 39-8(403), pp.49-50, 1991.8.
- 10) 寒川 旭: 地震考古学, 中央公論社, 251pp, 1992.10.
- 11) 染谷 昇, 沼田 淳紀, 森 伸一郎, 陶野 郁雄, 中村 裕昭: 後志利別川下流域の液状化地点における砂脈のトレンチ調査と粒度特性の検討, 第32回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1165-1166, 1997.7.
- 12) 陶野 郁雄 編著: 液状化による砂層の堆積構造の変化が強度特性に及ぼす影響に関する基礎研究, 平成7年~平成9年度科学研究費補助金(基礎研究(A)(1))研究成果報告書, 110pp, 1998.3.
- 13) 沼田 淳紀, 森 伸一郎, 陶野 郁雄, 遠藤 邦彦, 染谷 昇: まさ土埋立地盤の液状化地点におけるトレンチ調査, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.99-106, 1997.1.
- 14) 陶野 郁雄, 内田 明彦, 北浦 勝: 8.3 液状化による地盤災害の概要, 1993年釧路沖地震災害調査報告・1993年北海道南西沖地震災害調査報告, 日本建築学会, pp.433-449, 1995.8.
- 15) 陶野 郁雄, 遠藤 邦彦, 内田 明彦, 規矩 大義, 大益 宏, 足立 雅樹: 平成五年北海道南西沖地震による日本海沿岸地域の液状化災害, 第29回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1001-1002, 1994.6.
- 16) 森 伸一郎, 沼田 淳紀, 三輪 滋, 柴田 登: 1993年北海道南西沖地震における液状化地点調査, 第29回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1009-1012, 1994.6.
- 17) 足立 雅樹, 陶野 郁雄, 規矩 大義, 安原 一哉: 北海道南西沖地震において液状化によって発生した噴砂の粒度特性, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.781-786, 1994.12.
- 18) 大原 久和: 日本図誌大系(近畿I), 朝倉書店, pp.154-157, 1973.5.
- 19) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, 119pp, 1995.8.
- 20) 関 眞一, 森 伸一郎, 立花 秀夫: 鎌倉市由比が浜の遺跡の液状化跡における砂脈および液状化層の粒度特性, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.642-643, 1994.9.
- 21) 陶野 郁雄: 液状化現象からみた砂質堆積物の物理的・堆積学的特徴, 地質学論集, pp.15-42, 1986.3.
- 22) 森 伸一郎, 沼田 淳紀: 1993年北海道南西沖地震における函館市の臨海埋立地の液状化, 第29回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1015-1018, 1994.6.

(1999.3.12 受付)

# A STUDY ON SAND DIKES AND SAND BOILS CAUSED BY LIQUEFACTION

Atsunori NUMATA, Shin'ichiro MORI, Ikuo TOHNO and Kunihiko ENDO

Soils from sand boils formed during earthquakes were collected and examined to investigate the grain size distribution of the liquefied layers in the ground. However, such effectiveness of sand boils as an index has been questioned, since several observation results of sand dikes excavated in ruins revealed that the grain size distribution of soil in sand dikes differs from that in liquefied layers. In this study, the authors investigated the physical properties of soil in sand dikes, the mechanism of sand dike formation, and the relationship between sand dikes, sand boils and liquefied layers at three sites having liquefied during two earthquakes. As a result, soil particles in sand dikes were found sorted, being coarser in the lower part, and did not coincide with the grain size distribution of the soil particles in the liquefied layers or in sand boils. However, the grain size distribution of soil in sand boils was similar to that in the liquefied layers.