

造成宅地の新たな液状化流動破壊モードとそのメカニズム —平成 30 年北海道胆振東部地震での札幌市清田区の事例—

Unprecedented liquefaction failure mode and its mechanism -Case study at Kiyota ward, Sapporo city, during 2018 Hokkaido earthquake-

國生剛治*

Takaji KOKUSHO

2018年9月6日午前3時08に起きた地震では、札幌市清田区の造成宅地で今までに見られなかった液状化被害が発生し、多数の戸建て住宅に従来では考えられない大きさの沈下・傾斜被害が生じた。旧谷地形の水田を埋めた砂質地盤が液状化で非常に流動的になり地表には噴砂せず、大量の砂が地下からなくなり最長 200m も緩勾配地盤中を流動し造成地端部から流失したためである。類似の破壊モードは 2003 年十勝沖地震で北見市郊外農地でも起きており、細砂中に大量に含まれた非塑性細粒分が緩傾斜地盤中で流動性を増した可能性がある。従来の設計での考え方と大きく異なる今回の液状化流動破壊モードの重要性に鑑み、本稿では地震直後の調査結果に基づきその破壊メカニズムについて検討した。

キーワード：造成宅地、液状化、地中砂流動、体積収縮性、細粒分含有率

Residential landfill, liquefaction, subsurface flowable-sand-, contractility, fines content

1. はじめに

2018年9月6日午前3時08に起きた北海道胆振東部地震($M_f=6.7$)では、図-1に示すように震央から約50km離れた札幌市里塚1丁目の造成宅地で大規模な液状化が生じ、多くの戸建て住宅で非常に大きな沈下や傾斜が生じた。本稿では、従来設計で考慮してこなかったこのような液状化破壊モードの重要性に鑑み、被災直後の現時点(原稿締切日：2018年9月16日)までの筆者による調査結果や見解について報告する。

2. 被災速報

この宅地は国土地理院の航空写真¹⁾によると1978年以前は支笏火砕流堆積物(溶結・非溶結凝灰岩)から成る

丘陵部とそれに挟まれた帯状の水田を中心とした谷地形であった。1984年までにほぼ平坦な宅地に造成しており、造成盛土としては丘陵地の凝灰質の砂質土が使われたと推定される。

液状化地点から8kmほど離れた防災科研のK-NET HKD182 広島での加速度記録を図-2に示すが²⁾、地表最大加速度PGA=200gal弱、強い揺れの継続時間は20~30秒程度であった。

図-3は国土地理院¹⁾による今回の液状化被災地を含む地図であるが、1968年以前は丘陵とその間に入り込んだ沖積低地からなり、一番の低地は水田でその横は畑地に利用されていた。住民の方からの情報でも確認できたが、40年ほど前から一帯の開発が始まり短期間にほぼ平坦



図-1 平成 30 年北海道胆振東部地震震央位置など¹⁾

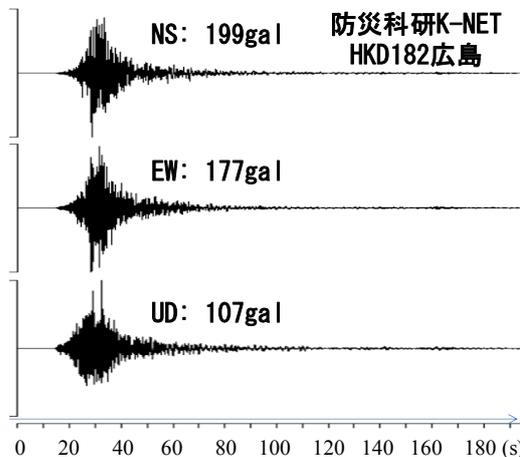


図-2 K-NET HKD182 広島 本震加速度記録²⁾

* 中央大学 名誉教授

Professor Emeritus, Chuo University



図-3 札幌市清田区里塚1丁目付近地図と液化化沈下影響範囲



図-4 同上地図と国土地理院航空写真(1961~1969)¹⁾から読み取った水田・畑地・丘陵地を重ね合わせ。

ではあるが平均勾配 1.5~3%で南に向かって緩く傾斜した宅地が造成されたようである。図中には宅地街路に沿って地盤が大沈下を生じた箇所を(筆者が目視調査)黄色の帯で重ね書きしている。今後正確な測量が必要であるが、沈下をしていないように見える近辺の地盤との最大相対沈下は 3m を越え、沈下帯の幅は 10~20 m はあると思われた。沈下の帯は造成宅地の東側端部に当たる地点 A から始まり徐々に高度を上げながら造成地の内部に延長約 200m にわたり連続していた。

図-4 には図-3 と同じ地図上に、国土地理院の 1961~1969 年の航空写真¹⁾から筆者が読み取った旧地形の水田・畑地・丘陵地の範囲を書き入れている。図-3 に記入した最大沈下の帯が水田や畑地の範囲と良く一致していることが読み取れ、液化化による大沈下量は旧地形の低地部の埋立厚さに支配されたことが分かる。

図-5~図-12 はこの造成エリアで地盤沈下に巻き込まれた戸建て住宅の写真(2018年9月7,8日筆者撮影)の例である。撮影位置①~⑧は図-3 に示されている。Google



Before (2016, Google street view)



after

図-5 造成宅地における撮影位置①での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-6 造成宅地における撮影位置②での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-7 造成宅地における撮影位置③での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-8 造成宅地における撮影位置④での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-9 造成宅地における撮影位置⑤での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-10 造成宅地における撮影位置⑥での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-11 造成宅地における撮影位置⑦での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-12 造成宅地における撮影位置⑧での地震前後の比較

ストリートビュー（2016～2017年撮影）を使った地震前後の比較写真としているが、ほぼ平坦であった宅地が地震後に通常の液状化では起き得ない大きさの沈下と傾斜による甚大な被害を蒙っていることが分かる。もう一つ指摘すべきは、これだけの大沈下にも関わらず道路や敷地に大亀裂が発生しておらず、噴砂がほとんど見られない点である。これらの大沈下を引き起こした地下の土はどこに行ってしまったのか？その土は地盤中を長距離

流動し造成宅地東側で地上に流出し、下流側一帯の低地を埋め尽くしたと考えられる。その流出箇所は図-3に示す造成宅地端部の地点Aであることは、大沈下の帯がそこで止まっていることから判定できる。

図-13～図-15は地点Aから下流低地側の地震前後の比較写真である。地震前はGoogleストリートビュー（2016年）、地震後は外部の人間は立ち入り規制されていたため、地元住民の方からご提供いただいた写真を使わせていた



Before (2016, Google street view)



after

図-13 造成宅地下流における撮影位置⑨での地震前後の比較

WWW.NAGAVI.TV



Before (2016, Google street view)



after

図-14 造成宅地下流における撮影位置⑩での地震前後の比較



Before (2016, Google street view)



after

図-15 造成宅地下流における撮影位置⑪での地震前後の比較

だしている。地震前に道路であった舗装面に大きな亀裂が口をあけ、その上流側には砂は見られず下流から砂の堆積がはじまっていることからここが噴出位置であったことは確実である。旧地形図によればこのあたりは旧水田地帯に至る水路が通っており、宅地造成に当たり排水管などの排水設備を設置していたとすれば、この地点 A

に排水設備出口があった可能性もある。

3. 液状化砂の長距離流動性

造成宅地の広域にわたって液状化した砂は途中で地表を突き破って噴出することなく、最長 200m ほど地中を長距離流動し地点 A から噴出したことになる。造成地は

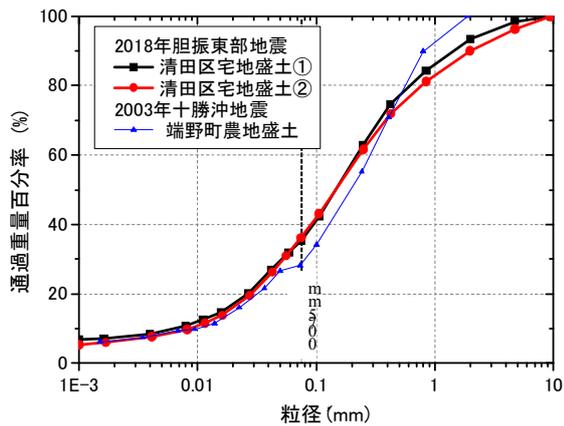


図-16 清田区造成宅地から下流に流出・堆積した砂の粒度分布と2003十勝沖地震で類似地盤破壊を生じた端野町造成農地の砂との比較

流出方向に平均 1.5~3%の緩い勾配があったが、大量の砂が地中からほぼ水平方向に流失したことで宅地に最大 3m ほどにおよぶ大沈下を 200m の長さにわたり引き起こした。これが生じるには勿論ある程度の時間が必要であったと思われる、宅地の沈下も徐々に進んだと推定される。実際、砂が堆積した下流域の地元住民の方から得られた証言では、「午前 3:08 分の地震発生時は暗かったため外で何が起きているか分からなかったが、水が流れるような音が絶え間なく聞こえ水道管の破裂かと思った。5 時過ぎに明るくなり外に出ると家の周りには既に砂で埋め尽くされており、付近の溝からはまだ砂の噴出が続いていた」とのことである。

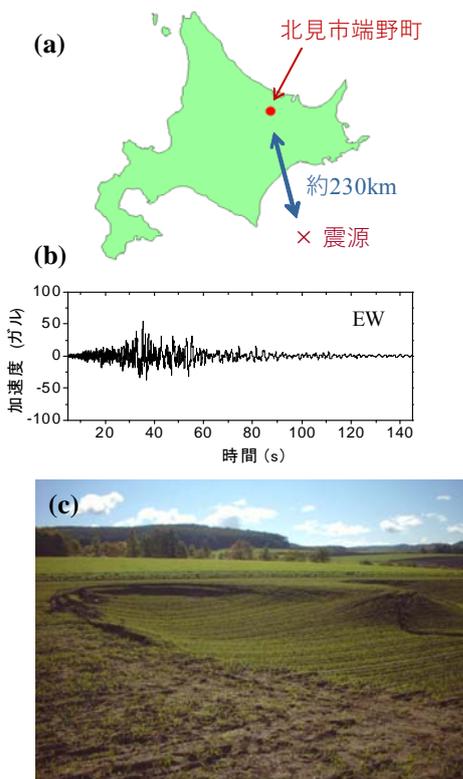


図-17 2003年十勝沖地震と端野町液状化地点(a), K-NET 北見 (EW)(b), 陥没した畑と畝筋(c)

液状化した砂のこれほどの長距離流動が可能となった理由については、宅地造成時に地中排水設備が設置されていたとすればそれがある程度関わった可能性も考えられるが、砂自身の特性にその根本的原因があると思われる。取り急ぎ実施した流出堆積砂 (ホテルクラウン前歩道とセイノーエクスプレス前の歩道の 2 か所で採取) の物理試験による粒度分布を図-16 に示す。採取地点は 50m ほど離れているが、極めて近い粒度分布であることが分かる。平均粒径 $D_{50}=0.13$ mm, 均等係数 $U_c=25\sim35$ の細砂で、細粒分の含有率は $F_c=35\sim36\%$ で非塑性 (NP) であり、土粒子密度は $\rho_s=2.26\sim2.28$ t/m³ と異常に低いことから軽石 (パミス) を多く含むと考えられる。

今回のような液状化事例は筆者の知る限り極めて稀ではあるが、例外的に 2003 年十勝沖地震 (MJ=8.0) の際に北海道北見市郊外端野町の造成農地で今回と酷似した液状化による地盤破壊が起きていた³⁾。図-17(a)のように液状化サイトは震源から 230 km も離れており、そこから 10km ほど離れた防災科研の K-NET HKD054 北見では図-17(b)のように PGA=54gal の弱い加速度が主要動 1 分間ほど記録されていた。これにより一帯に広がる農地数か所で液状化が起きたが、なかでも以前は水田であった谷地形を 30 年ほど以前に埋立造成し緩く傾斜 (3°) した畑地が長さ 150m 幅 35m にわたって最大 3.5m 沈下したが、図-17(c)の写真のように亀裂も噴砂も少なく小麦畑の畝筋は乱れることもなく整然と並んだままであった。図-18(a)(b)にはこの陥没エリアの全景とその下流端近くから噴出した砂の流下軌跡を含んだ航空写真と地盤調査点を含む平面図を示す。液状化した砂は陥没エリア端部 2 か所から噴出し下流 1km にわたり流れ下った。噴出砂の粒度分布を図-16 に重ね合わせているが、今回と酷似している。平均粒径 $D_{50}=0.12$ mm, 均等係数 $U_c=30$ の火山

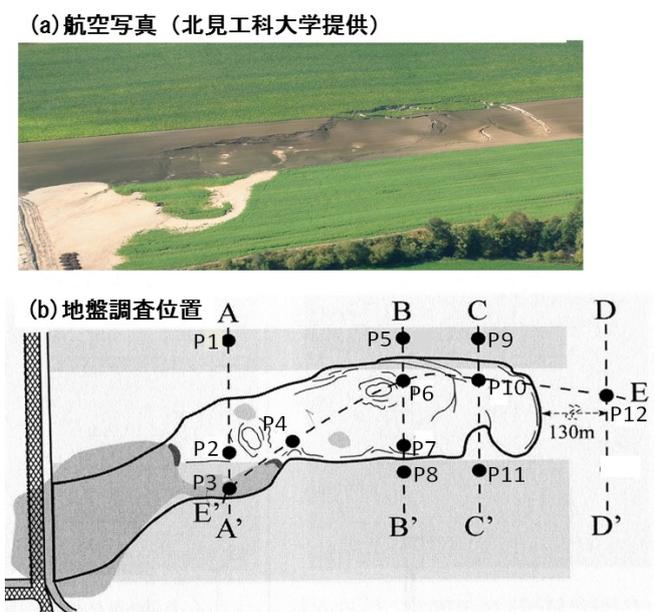


図-18 十勝沖地震での陥没農地の航空写真と下流域への砂流出の航空写真(北見工大提供)(a)と地盤調査位置³⁾(b)

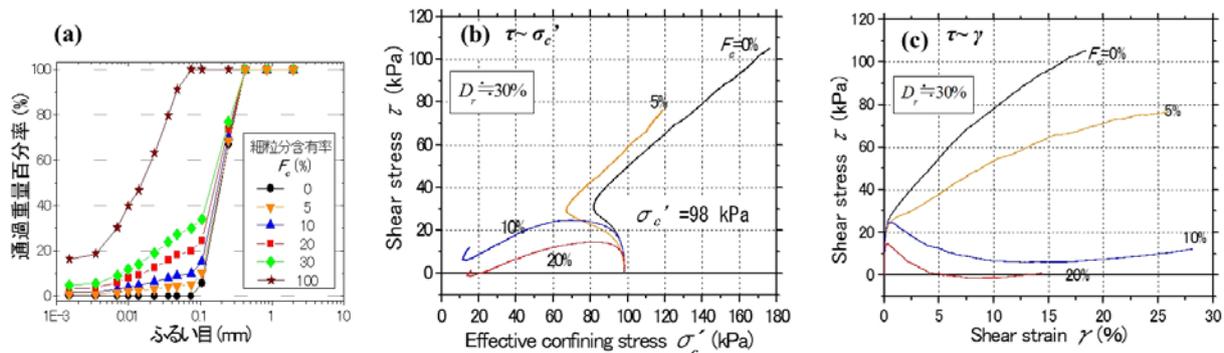


図-19 富津砂+非塑性細粒分供試体の中空ねじり非排水単調荷試験:
 (a)供試体粒度分布, (b)有効応力経路, (c)応力~ひずみ関係⁸⁾

起源の細砂で多少のパミスを含み土粒子密度 $\rho_s=2.465$ と低めの値が報告されている³⁾。細粒分含有率は $F_c=30\%$ で、細粒分は非塑性(NP)である。地盤調査として図-18(b)の平面図に示す点でスウェーデン式サウンディング(SWS)が行われたが、換算N値は地表からGL-6mの範囲で $N=1\sim 8$ と極めて低かった⁴⁾。

畑地の地表は沈下した後も小麦などの畝が整然と並び、陥没範囲で噴砂は全く起こっていなかった点も今回の事例に酷似している。つまり宅地のように地表が道路舗装や建物基礎などで覆われていなくても、地表への噴砂は起きていない。液状化した砂はやはりここでもかなりの流動性を持っていたと考えられる。

4. 液状化砂の流動性メカニズム

液状化した砂がこれほどの流動性を発揮するための重要な分れ目は、間隙水圧し液状化した砂が流動し非排水せん断される時に膨張性を示すか収縮性を示すかである。膨張する場合には間隙水圧は低下し有効応力が増加して流動性は失われるのに対し、収縮する場合は流動中も100%の水圧を維持し液体のような流動性が継続できるからである。

せん断される砂の膨張と収縮とを分ける条件として限界状態線(CSL: Critical State Line)の存在が知られており⁵⁾、密度が緩い砂で有効土被りが大きいほど収縮側となり易い。しかし通常の液状化問題においてはクリーンサンドは膨張側にあり、非排水繰返し荷条件では水圧が100%上昇し液状化するものの、一方向せん断では膨張側に転ずるために一方向への流動は起きにくいと言える。それでも砂が収縮性を示し流動しうるためには、いくつかの可能性が考えられる。

まず本震以降も余震が継続して小震動により砂の流動性が維持される場合で、室内実験や振動台実験などによりその効果が示されている^{例えは6)}。しかしその多少の貢献度は否定できないものの、常に流動性を維持するほどの余震の継続性が確保されるかは疑問である。

それより重要なのは、砂に含まれる細粒分の効果と思われる。非塑性細粒分が混じるとクリーンサンドのダイレイタンスー特性が劇的に変化し、膨張的から収縮的

明瞭に変化することが室内力学試験により示されてきた(例えば7⁸⁾)。図-19には一例として、今回液状化した砂に近い(a)に示す粒径分布からなる富津砂に非塑性細粒分を異なる細粒分含有率 F_c で混合した試料を使った中空ねじりせん断による(b) $\tau\sim\sigma'_c$ 関係と(c) $\tau\sim\gamma$ 関係を示す⁷⁾。相対密度 $D_r\approx 30\%$ の緩い供試体にも関わらず $F_c=0\%$ のクリーンサンドでは膨張性であるのに対し、 $F_c=10\%$ ではひずみ軟化を伴った収縮傾向に転じ、 $F_c=20\%$ ではさらに収縮性が強まり残留強度ゼロの状態まで激しく変化することが明瞭に分かる。これは細粒分含有率 F_c により砂のダイレイタンスー特性が大きな影響を受け、限界状態線CSLが変化するためである。実際、端野町の液状化地盤の砂は $F_c=30\%$ の非塑性細粒分を含んでいたし、今回の清田区の場合は $F_c=35\sim 36\%$ の大きな値である。

さらに、これら2地点の砂がいずれも火山起源の周辺地山を切り崩したものであり、河川沖積砂に比べて粒子破碎性が大きい可能性があり、これが大きな影響をおよぼしたことも考えられる。実際に清田区の砂は土粒子密度が $\rho_s=2.26\sim 2.28\text{ t/m}^3$ で通常の砂に比べて極端に小さく、パミス系の破碎性に富む粒子からなっている可能性がある。端野町についても $\rho_s=2.465$ の低い値のため、同じ可能性が疑われる。砂礫材についての実験例ではあるが、粒子破碎性が大きい材料は堅硬な粒子を持つ材料に比べて繰返し非排水せん断強度(液状化強度)だけでなく、液状化時の流動に関わる一方向非排水せん断強度も明瞭(1/10程度まで)に低下することが示されている⁹⁾。

ちなみに今回液状化した清田区の造成宅地から1~2kmに位置するゴルフ場斜面が2010年に $M_J=4.6$ 、 $PGA=40\text{ gal}$ 程度の直下地震により小規模な地すべり・流動破壊を起こしたとの報告がある¹⁰⁾。これら小地震でも不安定化する特徴は2003年十勝沖地震での端野町液状化とも共通しており、北海道の火山起源の砂の特性を反映している可能性もある。

最後に残された大きなナゾとして、「なぜ清田区と端野町の液状化で噴砂は地表に吹き上げなかったのか」がある。北海道特有の火山起源砂の性質や気候的条件が関わっているのか現時点では想像の域を出ない。ただし、上記いずれのケースでも共通的に、地盤は緩傾斜していた

ことと沈下した地盤に明瞭な亀裂が発生していないことは一考に値する。この共通の条件の下では、地中の砂がある深さで連続的に液状化し緩勾配を下流方向に移動しようとする、地盤の気密性により上流側に負圧が生じ表層を突き破る噴砂が生じにくくなるのではないだろうか。負圧は本来液状化で発生した過剰間隙水圧を下げることになるはずだが、それでも砂粒子間の有効応力の回復が起こらず流動性を保持しうる何らかのメカニズムが存在するのではないであろうか。

いずれにしても、従来の設計では想定してこなかった大きな地盤沈下・傾斜により家屋などへの甚大な影響を与えた今回の液状化流動破壊モードについて、メカニズム解明と対策の研究が必要である。

5. まとめ

- 1) 北海道胆振東部地震により札幌市清田区の造成宅地で起きた液状化では、多くの戸建て住宅に從來想定してこなかった規模の最大3mほどの沈下・傾斜をもたらした。
- 2) その大沈下メカニズムは従来とは全く異なり、沈下家屋近傍では噴砂は起きず、液状化した大量の砂は長距離離れた噴出箇所まで緩やかな勾配で地中を流動し失われることで、従来にない大きな沈下が引き起こされた。
- 3) 液状化した砂が継続的に流動できるためには、せん断され続ける砂の体積収縮性が鍵であり、幾つかの可能性が挙げられるが特に密度の緩い砂に含まれていた非塑性細粒分の働きが重要と考えられる。
- 4) 類似の地盤破壊が2003年の十勝沖地震の時に造成農地で起きたことがあり、砂が大量の非塑性細粒分を含んでいたことや地盤が緩く傾斜していたことなど共通点が多い。
- 5) 現時点でこの種の破壊モードの発生例は多くはないが、被害の深刻さを考えると今後、この新たなタイプの液状化沈下に対するメカニズムと対策の研究が必要である。

謝辞: (株) テレビ朝日報道局の山本将司様には液状化地点調査の機会をいただき、関連資料の準備もしていただいた。また防災科学技術研究所の石澤友浩氏には緊急的に砂の物理試験を引き受けていただいた。末筆ながら深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土地理院地図 : [://maps.gsi.go.jp/](http://maps.gsi.go.jp/)
- 2) 防災科学技術研究所 : <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 3) Tsukamoto, Y. Ishihara, K., Kokusho, T., Hara, T. and Tsutsumi, Y. (2009): Fluidisation and subsidence of gently sloped farming fields reclaimed with volcanic soils during 2003 Tokachi-oki earthquake in Japan, Geotechnical Case History Volume, Balkema, 109-118.
- 4) Kokusho, T. (2017): Innovated Earthquake Soil Dynamics, Chap. 5.6, P.328.
- 5) Casagrande, A. (1971): On liquefaction phenomena, Geotechnique, London, England, Vol. XXI, No.3, 197-202.
- 6) Meneses, J., Ishihara, K. and Towhata, I. (1998): "Effects of superimposing cyclic shear stress on the undrained behavior of saturated sand under monotonic loading." Soils and Foundations, Vol.38, No.4, 115-127
- 7) Ishihara, K. (1993): Liquefaction and flow failure during earthquakes, 33rd Rankine Lecture, Geotechnique, Vol.43, No.3, 351-415.
- 8) Kokusho, T. (2016): Major advances in liquefaction research by laboratory tests compared with in situ behavior, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 91, 3-22
- 9) 國生剛治 (2014): 地震地盤動力学の基礎—エネルギー的視点を含めて—, 鹿島出版会。
- 10) 田丸 淳, 石丸 聡, 川上源太郎, 岡崎紀俊, 横浜勝司, 三浦精一 (2012): 浅い内陸地震 (M4.6) により発生した札幌市清田区の地すべり, 報告, J. of Jpn, Landslide Soc., Vol.49, No.2pp.27-3.

An MJ6.7 earthquake of Sep. 6, 2018 in Hokkaido caused unprecedented severe liquefaction damage to private houses due to excessive settlement (exceeding 3 m) and inclination in a landfill residential area constructed by filling shallow valleys with cut and bank method.. A large quantity of liquefied sands laterally flowed underground 200 m in the longest in very-gently inclined land and spilled from a margin portion. This means that the sand should be very contractive to be able to become so much flowable. This case combined with a similar case occurred only once in a 2003 earthquake also in Hokkaido suggests non-plastic fines mixed in sands may play a key role in this strange flow behavior. Thus, possible mechanisms involved in this liquefaction case has been discussed based on information available at this moment just after the earthquake.