

まさ土埋立地盤の液状化地点におけるトレンチ調査

飛島建設(株) 沼田 淳紀*
飛島建設(株) 森 伸一郎**
国立環境研究所 陶野 郁雄***
日本大学 遠藤 邦彦****
飛島建設(株) 染谷 昇*

1995年兵庫県南部地震で液状化した地点で、噴砂と砂脈や液状化層の物理的特性の違いを検討することを一つの目的に、掘削調査を実施した。調査地点は、まさ土を主体とした埋立地盤であり、地震により岸壁の海側への傾斜、大きな海側への側方流動、岸壁と平行な亀裂、噴砂が確認された地点である。トレンチ調査により、砂脈を確認したが、砂脈の供給層は明瞭には確認できなかった。噴砂、砂脈および埋立土層の物理的性質を比較することで、以下のことがわかった。①砂脈内の砂の粒径は、下へ行くほど大きくなる。②液状化を生じたと考えられる埋立土層の粒度組成は、砂脈内の砂よりもむしろ地表で確認された噴砂と似ている。

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、神戸から大阪の大阪湾沿岸の海岸埋立地の多くで液状化が生じた。液状化が生じると、地盤より液状になった砂が噴出し、地表に砂が堆積することが多い。ここではこの地表に噴出した砂を噴砂と呼ぶこととするが、地震後の調査で、この噴砂を確認することが液状化発生の一つの裏付けとなる。さらに、森らは噴砂の粒度組成を調べることにより、埋立地の液状化について論じた¹⁾。これは、噴砂が液状化層の粒度組成を反映していると期待するものであり、ボーリングなどに比べれば、はるかに試料採取が容易で、特に地震直後の液状化層の粒度組成の把握には大変便利である。しかしながら、噴砂と液状化層の粒度特性の同一性については疑問が残る。すなわち、噴砂は噴出し堆積する過程で淘汰されると考えられること²⁾、また、液状化による砂の噴出経路の跡である砂脈を調査した遺跡調査における観察結果では、砂脈内の粒度組成と液状化層の粒度組成とは異なるので³⁾、液状化層の性質を反映しないとといった反論も示されている。

キーワード：液状化，トレンチ，噴砂

*飛島建設(株)技術研究所，0471-98-7553

**国立環境研究所地下環境研究室，0298-50-2484

***日本大学文理学部応用地学教室，03-3290-5451

そこで、噴砂、砂脈、液状化層の物理的性質の違いを検討することを一つの目的として、1995年兵庫県南部地震で液状化した地点においてトレンチ調査を行った。

ここでは、調査地点の被害とトレンチ調査の概要を示すとともに、埋立土層と噴砂、砂脈の物理的性質について検討を行う。

2. 調査位置の地盤

トレンチ調査地点は、神戸市灘区西部の図-1に

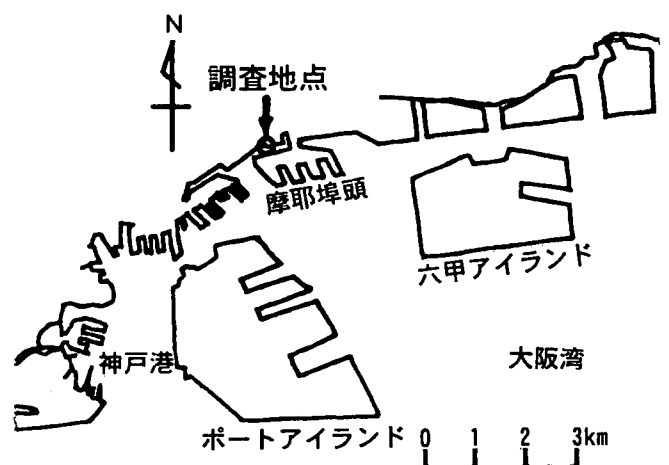


図-1 調査地点位置図

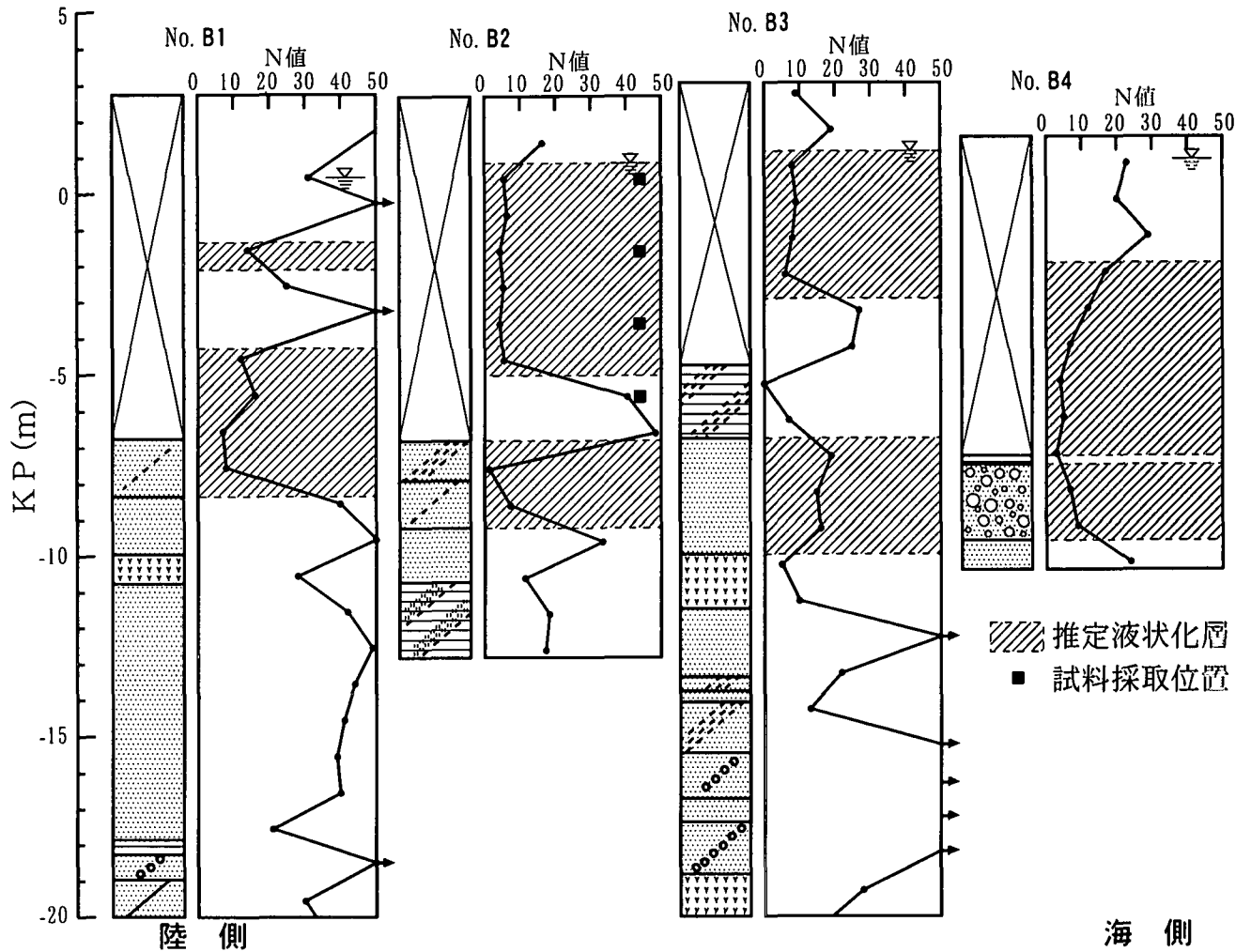


図-2 調査地点周辺のボーリング柱状図

示す海岸埋立地である。この地点は、1935年（昭和10年）～1967年（昭和42年）の間⁴⁾にまさ土を主体とし埋め立てられている。

調査地点から約150m以内のボーリング柱状図を図-2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、アスファルトなどを含んでいる。N値は20以下の低い部分も多く認められ、液状化層はKP0～-7m(GL-2～-9m)の緩い埋立土層である可能性が高く、KP-7～-10m(GL-9～-13m)の旧海底砂層の緩い部分の液状化も考えられる。図中には地下水位以下で、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。以降については、特に緩い埋立土層が液状化したものとして議論を進める。

図-3に埋立土層の粒度組成を示す。土粒子の密度も一部括弧内に示した。試料の採取位置は、

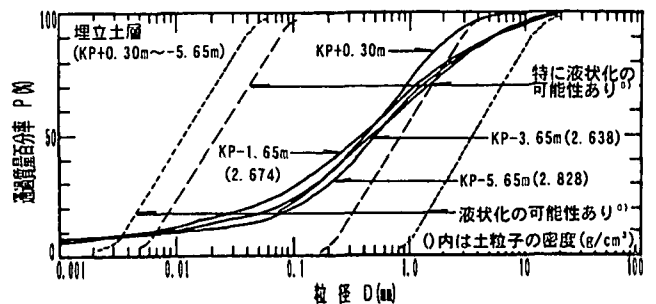


図-3 埋立土層の粒度組成

図-2中に示した。

均等係数は100以上と大きく、細粒分含有率P₁は18～27%、最大粒径は10～20mmである。採取試料が標準貫入試験によっているの、サンプラー内径35mmの制限を受けている可能性がある。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土層における調査結果⁵⁾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、埋立土層の粒度組成は、図-3に示したものとより最大粒径が大きく、細粒分が5～10%程度少ない可能性もあるが、概ね埋立土層を代表していると考えられる。

なお、図-3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立土層の平均的な粒度組成⁵⁾とほぼ一致している。また、土粒子の密度も、ポートアイランドで採取したまさ土が 2.65g/cm^3 であったので、KP-5.65mでの試料を除けばほぼ一致している。

目安のために、図中には港湾基準⁶⁾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。

3. トレンチ調査の方法

トレンチ調査の位置は、地震直後の航空写真と現地状況から判断して決めた。調査は、地震から約1年経過後の1996年3月に実施した。図-4にトレンチ調査の位置を示す。図には1996年3月の調査に基づき、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-4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、液状化層と考えられ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、現地で周囲の状況、砂脈や亀裂の状況を観察し、主に砂脈内の各所で試料を採取した。採取した試料は持ち帰り、物理試験を実施した。

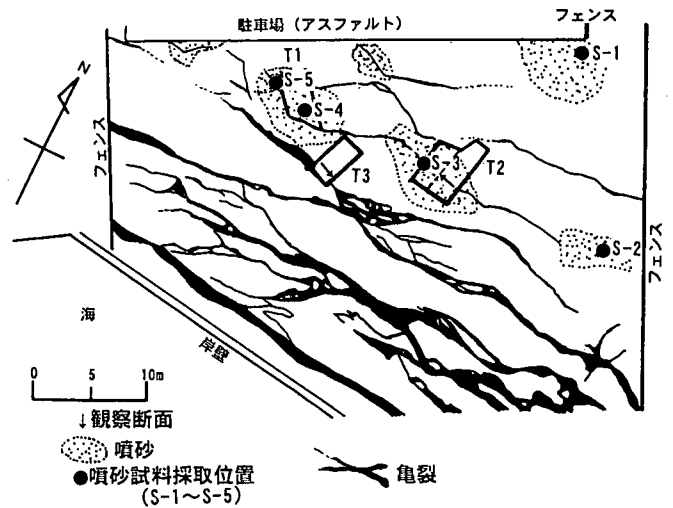


図-4 トレンチ調査位置図

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。背後地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-4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、GL-80cm以深から亀裂内に砂脈が確認された。砂脈の最上部に堆積した厚さ15cmの砂は、地震後二次的に堆積した⁷⁾。その下には液状化によって生じたと考える砂脈が下方に続いていた。亀裂内に液状化層から供給された砂が上昇してきても、供給量が亀裂開口量より少ないときには地表面まで噴出しないことが確認できた。さらに海側の亀裂には、亀裂内に海水が入り込んでいたため目視による確認はできなかったが、以上の観察事実により亀裂下部には液状化によって生じた砂脈が同様に存在するものと推察される。

したがって、噴砂は、岸壁から20m程度離れた地点にしか確認できなかったが、液状化は岸壁近傍まで生じていたものと考えられる。亀裂が地下の液状化層による側方流動に起因するものとする、亀裂の大きい場合には地表面まで液状化した砂が噴出しないこともあるといえる。

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事例が多かった。これらは、前述の理由によると考えられる。

5. 砂脈の観察

T2 トレンチの西側断面で確認された砂脈と GL-1.45m 付近で確認された水平面での砂脈の状況をそれぞれ図-5 と図-6 に示す。T2 トレンチ西側断面は、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思われる。図-5 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から連続していた。その下から GL-110cm 程度までは、黄褐色、淡茶褐色の砂や礫が入り交じって堆積していた。この部分は、周囲の地盤との境界もはっきりせず、周囲の土を巻き込んでいるように見えた。GL-60cm ~ -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-110cm ~ -200cm は青灰色の砂で、堆積状況は連続的に変化し、GL-110cm 付近では細砂だが下へ行く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 より下であり、下方からの供給と考えられるが、それより上は、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ことがわかった。

図-5 に示した断面をさらに水平方向に奥へ掘削すると、空洞は上下方向に広がり、さらに掘削すると GL-140cm 程度から上は地表まで空洞となった。その亀裂の側壁には、青灰色の粘土が付着していた。

図-6 の水平面に観察された砂脈内は、ほぼ均質な青灰色の粗砂で、西側断面下部の砂脈に連続し、上部で見られたような色調や粒径の異なる砂の入り交じりは認められなかった。したがって、前述した GL-110cm より下に見られた下方からの供給砂は平面的にもほぼ均質であると考えられる。

図-7 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ものである⁷⁾。その下は、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き土質の砂層が GL-150 ~ 160cm 程度まであり、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、T2 トレンチの砂脈に見られた供給源の違いと下方から堆積の連続性は T3 トレンチでも確認されたが、T3 トレンチでは、GL-100 ~ -120cm の間と GL-160cm 以深では色調や土粒子密度が類似していることから、この間の砂脈内の砂は同一の供給源と考えられる⁷⁾。

6. 噴砂の物理的性質

図-4 に示した地点で採取した噴砂の粒度組成を図-8 に示す。図中には、図-3 に示した埋立土層の粒度組成の範囲も示した。噴砂の採取にあたっては、時間経過を考慮し、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。

噴砂の粒径加積曲線は、粒径 1mm 以上では埋立土層の範囲内にあるが、それ以下の細粒側では埋立土層より通過質量百分率で 10 % 前後下側にある。また、土粒子の密度は、埋立土層が KP-5.65m の 1 つを除けば $2.64 \sim 2.67 \text{g/cm}^3$ であるので、 $0.03 \sim 0.05 \text{g/cm}^3$ 程度大きめである。

噴砂の噴出する過程や地表に堆積する過程もしくは雨水による影響で、細粒分が失われた可能性もあるものの、標準貫入試験の試料が掘削した材料に比べて 5 ~ 10 % 程度細粒分が多くなることを考慮すると、噴砂と埋立土層の粒径加積曲線は良く一致している。なお、埋立土層に鋳滓や鉄片が含まれていることから、噴砂の方が若干土粒子密度が大きくなったものと考えられる。

7. 砂脈内の砂の物理的性質と砂脈形成メカニズム

4. および 5. で示した観察結果を定量的に検討する。

図-9 に T2 トレンチの西側断面の地盤の地山の粒度組成を示す。さらに、T2 トレンチと T3 トレンチの砂脈内の砂の粒度組成を図-10 ~ 図-13 に示す。それぞれの図中には、図-3 で示した埋立

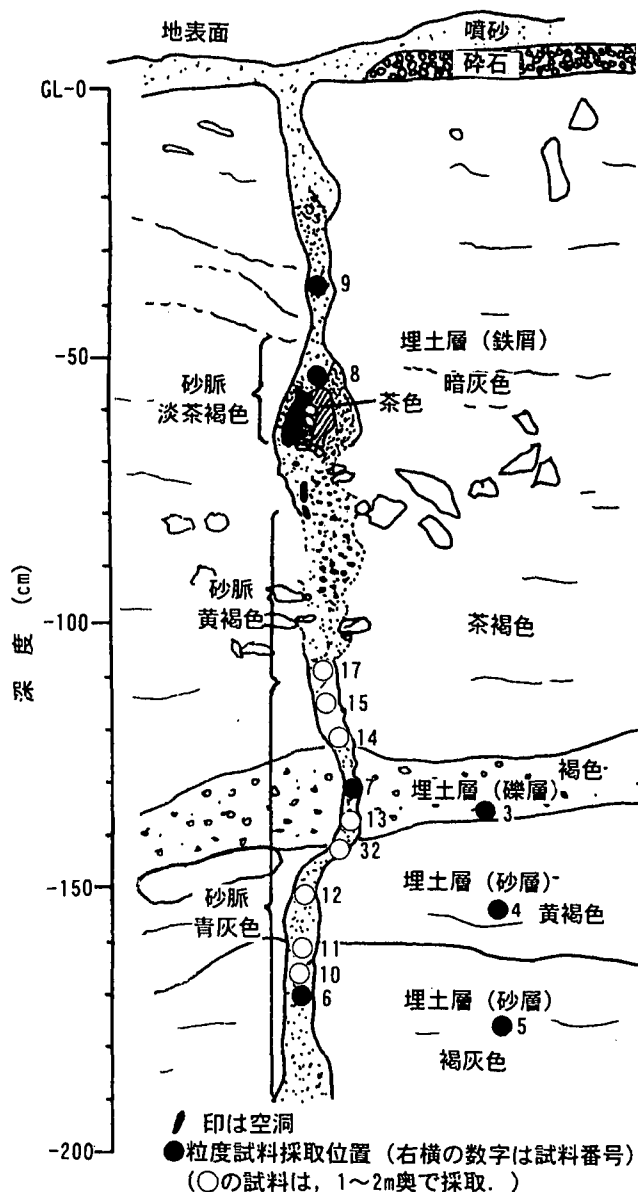


図-5 T2トレンチ西側断面の砂脈の状況

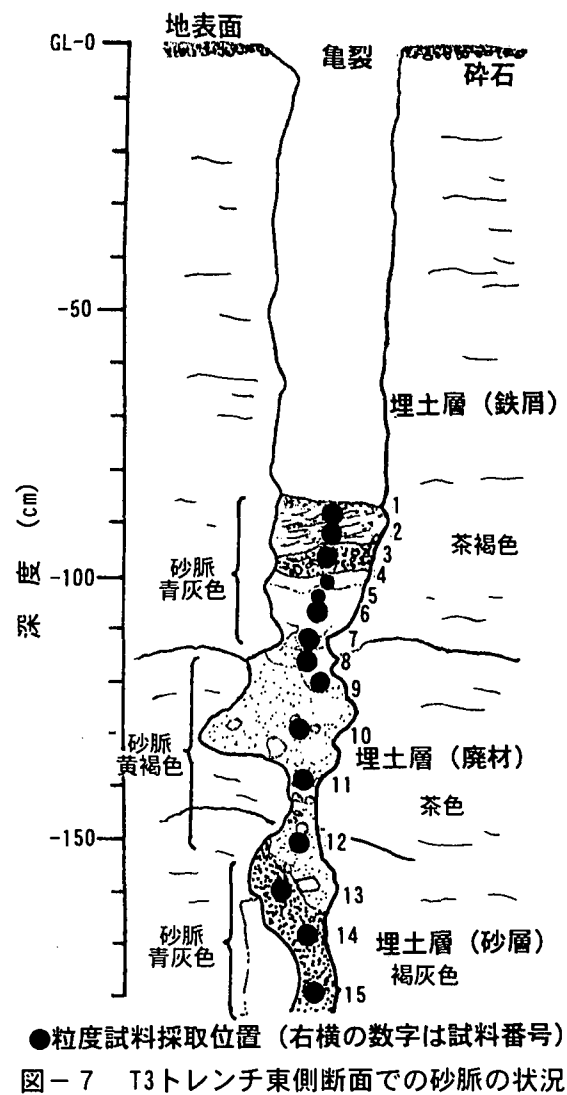


図-7 T3トレンチ東側断面での砂脈の状況

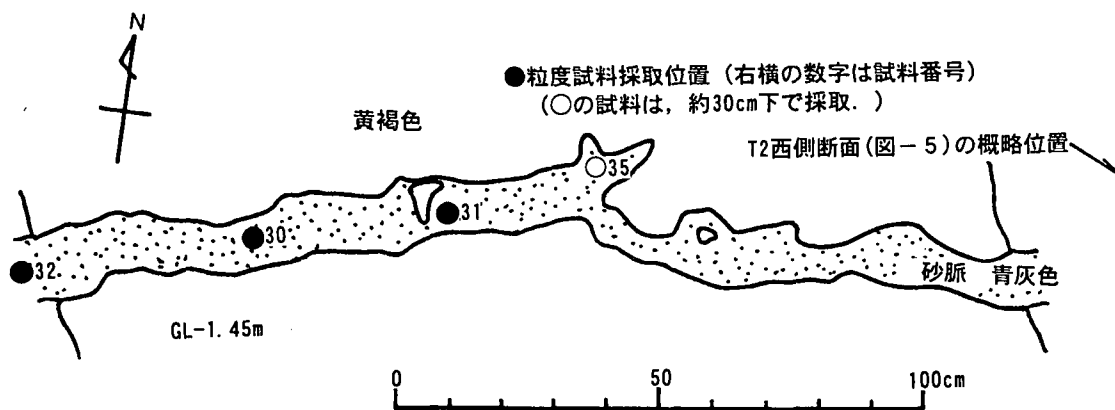


図-6 T2トレンチGL-1.45mでの水平面の砂脈の状況

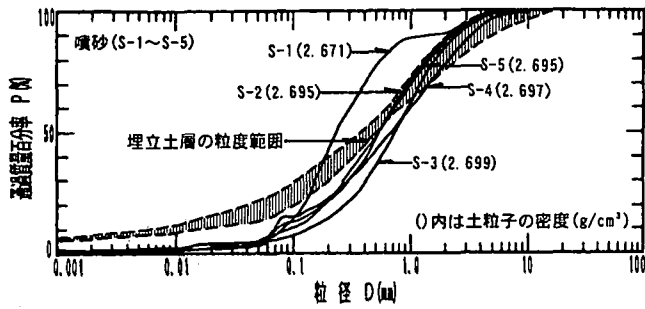


図-8 噴砂の粒度組成

土層の粒度範囲を併記するとともに、土粒子の密度を括弧内に示した。各試料の採取地点は図-5～図-7に示した。図-10はT2トレンチ西側断面の砂脈であるが、主にGL-110cm以深に認められた下方からの供給により連続的に堆積したと考えられる青灰色の砂脈のみ示した。また、図中の試料は、一つの断面で採取された試料だけではなく、図-5の断面をさらに奥へ掘削した際に採取した試料も示した。図-11は、奥へ掘削した際に認められた約GL-1.45mの水平面での砂脈である。図-12と図-13は、T3トレンチ東側断面の砂脈であるが、下方からの連続性が不連続な黄褐色の砂脈以浅(図-12)とGL-150cm以深の下方からの供給により連続的に堆積したと考えられる青灰色の砂脈(図-13)とに分けて示した。

図-9に示した地盤の粒度組成は、層によりかなり異なるが、No.4とNo.5の砂層は埋立土層の粒度組成に近い。

図-10～図-13に示すように、砂脈内の砂はいずれも均等係数の小さい分級の進んだ粒径加積曲線を示す。また、砂脈内の鉛直断面上の粒径加積曲線を示した図-10、図-12、図-13より、分級が深度方向に規則的に変化していることが良くわかる。砂脈内の砂は、いずれも細粒分が少ないが、T3トレンチの4の部分、断面観察においても粘土分が卓越していたが、図-12においても細粒分が多く、粘土分含有率は液状化層と考えられる埋立土層の約2倍にも達する。なお、T3の4は、砂脈の最上部であり、T3トレンチの断面内では連続していなかったが、下方からの連続的に堆積していた部分と同一の供給源と考えられる部分である。

このような砂の分級状態を把握するため、図-10～図-13に示した砂脈内の砂の内、供給源が同一と考えられる青灰色の砂の50%粒径 D_{50}

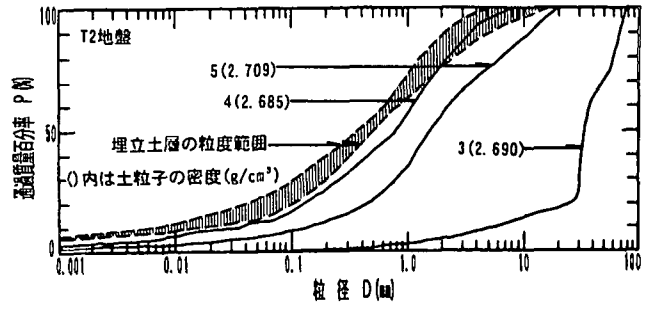


図-9 T2トレンチ地盤地山の砂の粒度組成

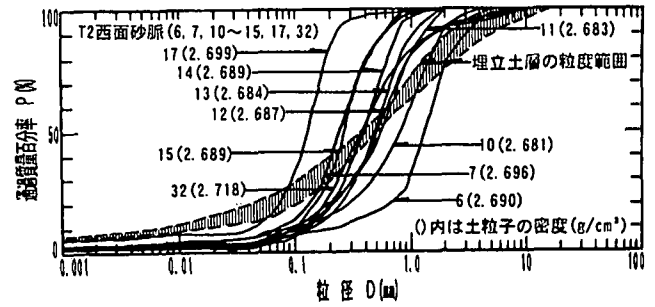


図-10 T2トレンチ西側断面砂脈内の砂の粒度組成

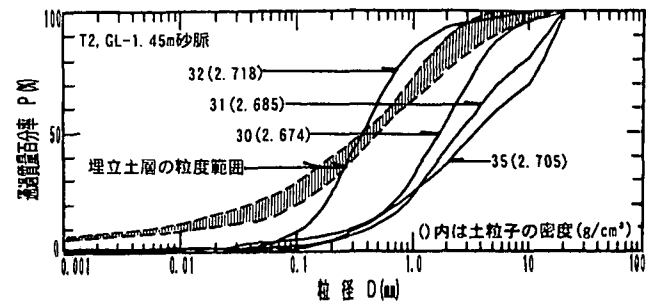


図-11 T2トレンチGL-1.45m水平面砂脈内の砂の粒度組成

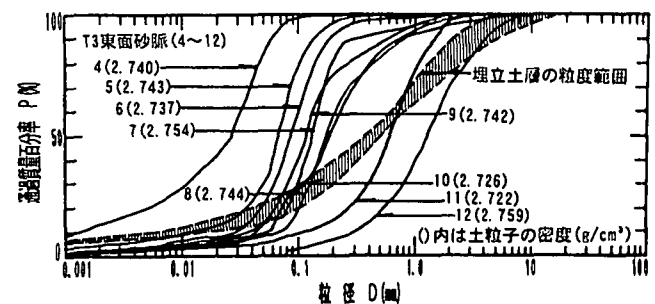


図-12 T3トレンチ東側断面砂脈内の砂の粒度組成 (No. 4～No. 12)

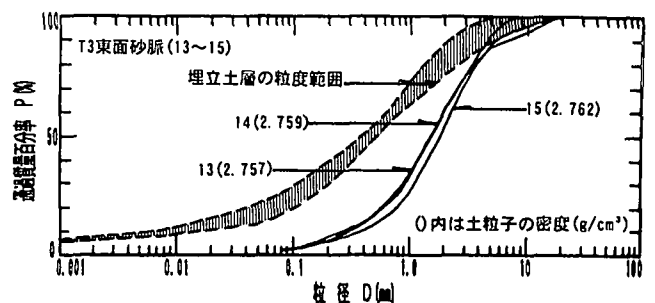


図-13 T3トレンチ東側断面砂脈内の砂の粒度組成 (No. 13～No. 15)

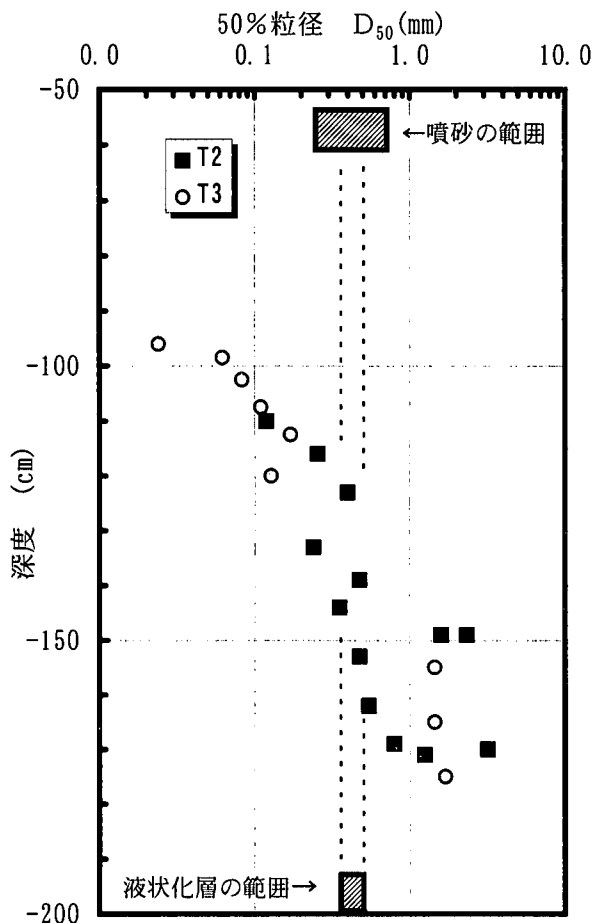


図-1 4 供給層が同一の砂脈の50%粒径深度分布

の深度分布を図-1 4に示す。T3トレンチでの砂脈内の砂は一部観察断面内で連続していないが、T2トレンチでの砂は、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、それぞれ地表面の噴砂と液化化層と考えられる埋立土層の D_{50} の範囲を示した。噴砂と液化化層は一致するが、砂脈内の砂は、砂の供給源である液化化層と比べて、砂脈上部で細粒側に、砂脈下部で粗粒側に変質していることがわかる。これは、液化化により砂が噴出する過程、または、噴出終了後に砂粒子が沈降して行く過程で砂粒子が分級し、粒径の大きなものほど先に沈降し堆積するためと考えられる^{1) 8)}。地震後のトレンチ調査では、この過程の最終段階の堆積状態の断面を観察していることになる。

したがって、図-3に示した砂脈の供給層と考えられる埋立土層の粒度組成と砂脈内の粒度組成は、おのずと異なり、噴砂の粒度組成の方がむしろ埋立土層の粒度組成と似ている。

以上より、調査地点における砂脈形成のメカニズムを次のように考えると理解できる。

緩いまさ土主体の埋立地盤が、強い地震動により液化化を生じる。上昇した過剰間隙水圧は地盤の亀裂を伝い地表に逃げようとするので、液体状になった砂を地表に噴出する。この時の噴出の程度は、液化化層の砂がその流れの中で分級されるような速度ではなく、ほとんどの土粒子を運搬するのに十分な速度であった。地震が終わると、過剰間隙水圧は消散し始め、噴出速度が遅くなり、終いには噴出も止まる。この時、砂は粒径の小さなものを水中に残し、粗いものから順に沈降堆積し砂脈を形成する。

8. まとめ

- (1) 地表の噴砂は、岸壁から20m以上離れたところにしか存在しなかったが、岸壁近くの亀裂内にも、液化化により下方より供給された砂による砂脈が確認された。
- (2) 砂脈内の砂の粒径は、地盤の液化化により砂が噴出するとき、または、噴出が止まり沈降するときに分級作用を受け、液化化層の粒径に比べて、砂脈上部では小さく下部では大きくなり、粒度組成は一致しない。
- (3) 本調査地点の場合、液化化層の砂の粒度組成は、噴砂の細粒分は少なくなっているものの、全体的には砂脈内の砂よりもむしろ地表で確認された噴砂と一致性が高い。

【参考文献】

- 1) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液化化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39.No.2, pp.17-22, 1991.2.
- 2) 吉見吉昭: 浚渫埋立土の粒度・塑性特性と液化化抵抗, 土と基礎, Vol.39, No.8, pp.49-50, 1991.8.
- 3) 寒川旭: 地震考古学, 中央公論社, 1992.10.
- 4) 大原久和: 日本図誌大系(近畿I), 朝倉書店, pp.154-157, 1973.5.
- 5) 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-トアイラント', 六甲アイラント')報告書, pp.64-71, 1995.8.

6) 日本港湾協会 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 ,pp.203-209,1988.6

7) 沼田淳紀 , 森伸一郎 , 陶野郁雄 , 遠藤邦彦 : 1995年兵庫県南部地震の液状化地点における掘削調査と砂脈の物理的性質 , 土木学会第 51 回年次学術講

演会講演概要集第 3 部 ,pp.288-289,1996.9.

8) 関真一 , 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.

Trench Excavating Investigation at a Liquefied Site Reclaimed with Weathered Granite Soil

Atsunori NUMATA, Shin'ichiro MORI, Ikuo TOHNO, Kunihiko ENDO, Noboru SOMEYA

In order to examine differences of physical characteristics for erupted sand, sand in dykes and sand in source layer of supply, trench excavating investigation was carried out at a liquefied site during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake in Kobe. The investigated site was reclaimed with weathered granite soil, "Masa-do". There were large lateral spread toward sea, fissures in parallel with quay wall line and erupted sand, and they were observed soon after the event. In three excavated trenches, sand dykes were observed and investigated, but source layer of supply was not recognized clearly because sand dykes continued downward under excavation bed. Source layer, that is liquefied layer, was estimated according to soil profiles and laboratory test results by boring data. In sand dyke, grain size distribution curve was becoming coarser as the sampling location went to the deeper. It was recognized that erupted sand on surface was similar to liquefied layer rather than sand dykes about grain size distribution.