

2001年芸予地震で液状化が生じた地盤の諸特性

Characteristics of Liquefied Ground due to the 2001 Geiyo Earthquake

| | | | |
|-------|---------------------|------------|----------------|
| 藤井 照久 | Teruhisa FUJII | (復建調査設計(株) | 地質調査部地盤技術 1 課) |
| 木村 康隆 | Yasutaka KIMURA | (復建調査設計(株) | 地質調査部地盤技術 2 課) |
| 若槻 好孝 | Yoshitaka WAKATSUKI | (復建調査設計(株) | 地質調査部地質技術課) |
| 木下 博久 | Hirohisa KINOSHITA | (復建調査設計(株) | 地質調査部地質技術課) |
| 原口 強 | Tsuyoshi HARAGUCHI | (復建調査設計(株) | 東京支社地質調査課) |
| 中ノ堂裕文 | Hirofumi NAKANODO | (復建調査設計(株) | 技術研究所) |

2001年に発生した芸予地震では、竹原市から廿日市市に至る広島県南部の沿岸部を中心に液状化による噴砂が確認された。著者らは、芸予地震直後に現地で採取した噴砂を用いて物理試験を行い、さらに液状化が生じた地点のうち、噴砂が多く流出していた出島地区において、ジオスライサー調査、ボーリング調査、不攪乱試料採取を行い、採取した不攪乱試料に対して一連の物理試験および液状化試験（繰返し三軸試験）等を実施した。本報告では、地表面に噴出した噴砂がどのように形成されたかを検討し、さらに噴砂と液状化が生じたと予想される地盤の物理特性の比較、採取した不攪乱試料の液状化強度特性から芸予地震によって液状化が生じた地盤の諸特性について検討を行った。

キーワード：2001年芸予地震、液状化、噴砂、ボーリング調査、ジオスライサー調査
(IGC: C00, C08)

1. まえがき

2001年3月24日15時28分頃、広島県南部の安芸灘を震源とするマグニチュード (M_{JMA}) 6.4の地震が発生した。この地震では、震源深さが約51kmと深かったため広い範囲で強い揺れが記録された。この強い揺れに伴い、竹原市から廿日市市に至る広島県南部の沿岸部を中心に液状化による噴砂が確認された。広島県南部の沿岸部周辺は、1600年代より干拓開発が行われている¹⁾が、今回の地震で液状化による噴砂が確認されたのは1947年以降に開発された比較的若齢な海岸埋立地に集中していた。

著者らは、芸予地震直後に現地で採取した噴砂を用いて物理試験を行い、さらに液状化が生じた地点のうち、噴砂が多く流出していた出島地区において、ジオスライサー調査、ボーリング調査、不攪乱試料採取を行い、採取した不攪乱試料に対して一連の物理試験および液状化試験（繰返し三軸試験）等を実施した。本報告では、地表面に噴出した噴砂がどのように形成されたかを検討し、さらに噴砂と液状化が生じたと予想される地盤の物理特性の比較、採取した不攪乱試料の液状化強度等からの芸予地震によって液状化が生じた地盤の諸特性について検討する。

2. 噴砂の特性

図-1は、広島市、廿日市市において芸予地震直後に噴砂を採取した位置を示したものである。図中にはそれぞれの地点の土地利用状況も示している。各地点の埋立完成年は、「広島市の埋立史」¹⁾によればA、B地点で1966年、C

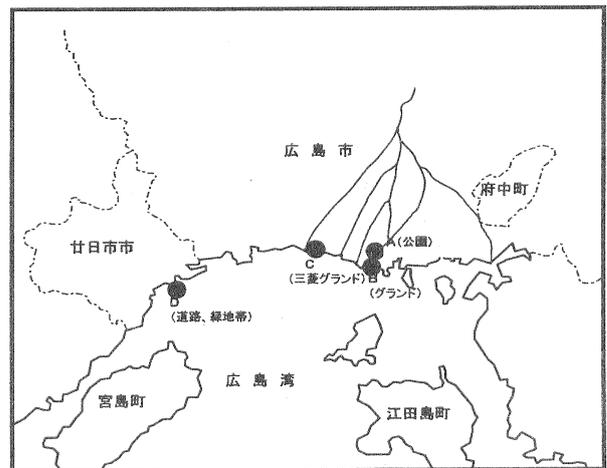


図-1 噴砂採取位置

地点で1947年と報告されている。D地点は明確ではないがA、Bと同様に埋立から約30年未満の比較的若齢な埋立地であると考えられる。

各地点の噴砂状況は、次のとおりである。A～C地点の噴砂は地表面に覆われている褐色のまさ土ではなく、埋立時の浚渫砂と推定される暗灰色の砂が地中より噴き上げていた。一方、D地点の噴砂は、道路構築時に埋土材として用いられたまさ土が道路一面に噴き上げていた。表-1に噴砂の物理特性を、また図-2に採取した噴砂の粒径加積曲線を示す。なお、図中には港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾に示されている均等係数 (U_c) が3.5未満の場合の「特に液状化の可能性あり」の範囲を破線で示している。この図より、D地点を除いた3地点の噴砂は「特に液状化

表-1 芸予地震で採取した噴砂の物理特性

| 地点 | Dmax (mm) | D50 (mm) | Uc | Uc' | Fc (%) | 土質区分 | 記号 |
|----|-----------|----------|-----|-----|--------|--------|----|
| A | 0.425 | 0.085 | 4.6 | 1.1 | 43 | (SM) | ☆ |
| B | 4.75 | 0.18 | 2.2 | 1.8 | 8 | (S-F) | ★ |
| C | 4.75 | 0.42 | 2.2 | 1.0 | 1 | (SP) | ○ |
| D | 9.5 | 0.89 | 2.9 | 0.9 | 2 | (SP-G) | ● |

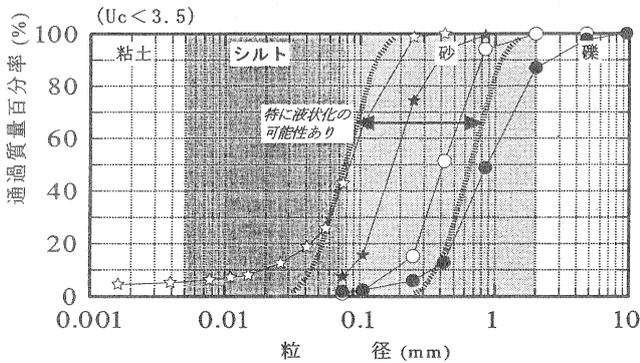


図-2 芸予地震で採取した噴砂の粒径加積曲線

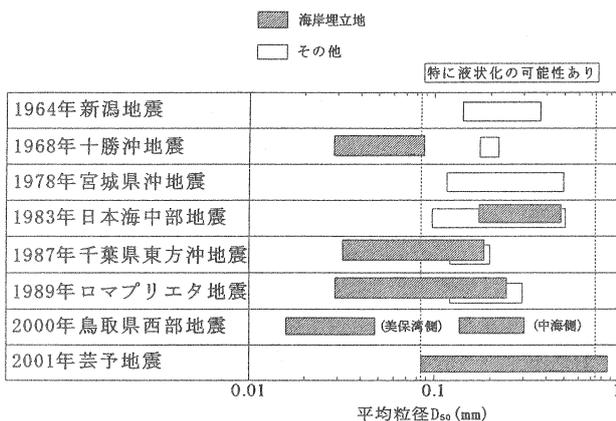


図-3 過去の地震で生じた噴砂の平均粒径との比較 (森ら³⁾の結果に加筆)

の「可能性あり」の範囲内に位置し、液状化しやすい土であったことがわかる。一方、D地点の噴砂は、「特に液状化の可能性あり」の範囲からやや右側に外れ、大半が粗砂で構成されていることがわかる。全体の粒度分布状況を見ると各地点で採取した粒径加積曲線はそれぞれにその形状が異なり、粒度が広範囲に分布していることがわかる。

図-3 は過去に森ら³⁾によって調べられた噴砂の平均粒径 (D₅₀) の範囲に、芸予地震で採取した噴砂の平均粒径の範囲および 2000 年鳥取県西部地震で採取された噴砂の平均粒径の範囲をそれぞれ加筆したものである。この図より芸予地震の平均粒径の範囲は、森らが示した範囲の粗粒側に位置し、その範囲も広域に分布していることがわかる。一方、鳥取県西部地震の平均粒径の範囲は、美保湾側と中海側でその性状が分かれ、特に美保湾側の平均粒径の範囲は森らが示したものよりさらに細粒側に分布し、芸予地震とは全く異なった噴砂であることがわかる。

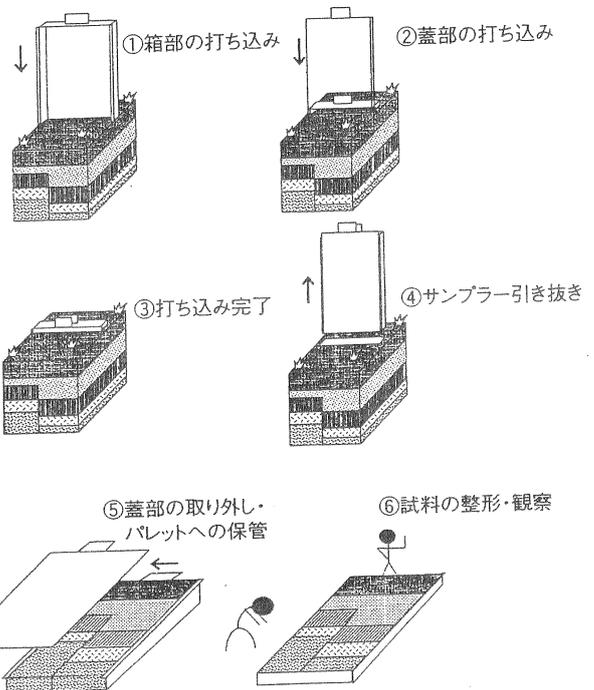


図-4 ジオスライサーの実施手順

3. 液状化が発生した地盤の諸特性

芸予地震で液状化が発生した広島沿岸部の地盤特性を調査するため、噴砂が著しく生じた出島地区 (図-1 の B 地点) においてジオスライサー調査およびボーリング調査等の地盤調査を実施した。出島地区は先にも述べたように 1966 年に埋め立てられた比較的新しい海岸埋立地である。噴砂が確認されたのは、出島埋立地のほぼ先端部に位置するグラウンド内である。噴砂孔の形状は割れ目状のものや、クレーター状のものがグラウンド内で多数確認された。

(1) ジオスライサー調査

ジオスライサー調査は、未固結層の垂直断面を面的に抜き取ることが可能である。基本的構造はコの字状のサンプラー部と蓋部からなる。作業手順は、まず油圧圧入装置でサンプラー部を地中に圧入し、次に蓋部をサンプラー部に沿って挿入し、地層を挟み込んでクレーンで引き抜き、地層を採取する (図-4)。採取した地層は、地上にならばサンプラー部から蓋部を取り外した後、その場で観察でき必要に応じて地層断面として持ち帰ることができる。ジオスライサーの主な特徴は、以下のとおりである。

- ① 定方向にサンプリングが可能である。
- ② 連続した地層断面が採取できる。
- ③ 採取した地層断面試料の持ち運びが可能である。



写真-1 ジオスライサー実施状況



写真-2 ジオスライサーを実施した地点の噴砂状況

④ 1 箇所当たりの作業時間が短く、効率がよい。

⑤ 調査時の地盤破壊が小規模である。

今回の調査手法は、中田・島崎⁴⁾、原口ら⁵⁾に基づいて行い、サンプラーは幅 36cm の鋼矢板を用いた(写真-1)。

ジオスライサー調査は、写真-2に見られるような一列ないしは雁行状に幅 1~4cm の亀裂が約 7m にわたって連続する割れ目状の噴砂孔を横断するような形で実施した。噴出物は淘汰の良い暗灰色の細粒砂からなり、亀裂孔の両側に約 1m の範囲において、10cm 程度の厚さで堆積していた。割れ目の垂直方向への連続性は悪く、地表面下約 10cm 以深では不明瞭となっていた。

a) 調査地の層序と液状化の構造

ジオスライサーにより、GL-5.0m までの断面試料を採取した。その成層状況および噴砂の状況を写真-3 中に示す。ジオスライサーにより確認した試料は海岸埋立地造成時の埋土層で上位より、まさ土、建設廃材混り砂質土、分級した浚渫土(有機質粘土層、砂層、貝殻・礫混り粗砂)の 3 層に分類される。以下、各層の特徴を示す。

① まさ土

層厚は 10cm 程度で、褐灰色の粗砂を主体とし構成されている。非常に密実に締め固められている。

② 建設廃材混り砂質土

層厚は約 1.3m で、褐灰色の礫混り砂質土からなる。礫のほか、アスファルトやコンクリート片などの建設廃材が含まれる。砂はシルト混り中~粗粒砂で淘汰は悪い。比較的良く締まっている。

③ 浚渫土

浚渫土は、埋立時にサンドポンプで浚渫されたもので、そのため深度によって分級されている。GL-1.3m~1.5m 間は暗灰色の有機質粘土で、全体に海側に傾斜して分布する。層厚は 5cm 程度で、全体に乱れが激しい。GL-1.5m~2.3m 間は、淘汰の良い暗灰色の細~中粒砂が分布する。全体に上方で細粒化を示し、上位の 30cm にはトラフ型の斜交層理が発達する。これらのことから、この間は比較的静かな堆積環境にあり、上位では波浪の影響を受けていたことが分かる。GL-2.3m 以深には暗灰色の中粒~粗粒砂が分布する。全体に、貝殻片や円礫を多く含む。全体にルーズで淘汰は悪いが、貝殻片の堆積状態から弱いラミナ構造が認められる。

b) 噴砂の噴出構造

地層の変形、噴砂跡等から、液状化層は浚渫土のうち有機質粘土に深の砂層で発生したと考えられる。液状化した浚渫砂層は、写真-3でも分かるように上位の有機質粘土、建設廃材混り砂、まさ土を貫き、大きく湾曲しながら上方へ延びている(写真-3 中赤矢印で示している)。噴砂の流動跡は、幅 1~3cm で、レンズ状~薄層状であった。上方への連続性は悪く、上部では幅数 mm となり、肉眼での観察が困難となっている。

(2) ボーリング調査

ボーリング調査は、ジオスライサー調査と同一敷地内で約 10m 程度離れた場所で行った。図-5 に調査地点のボ

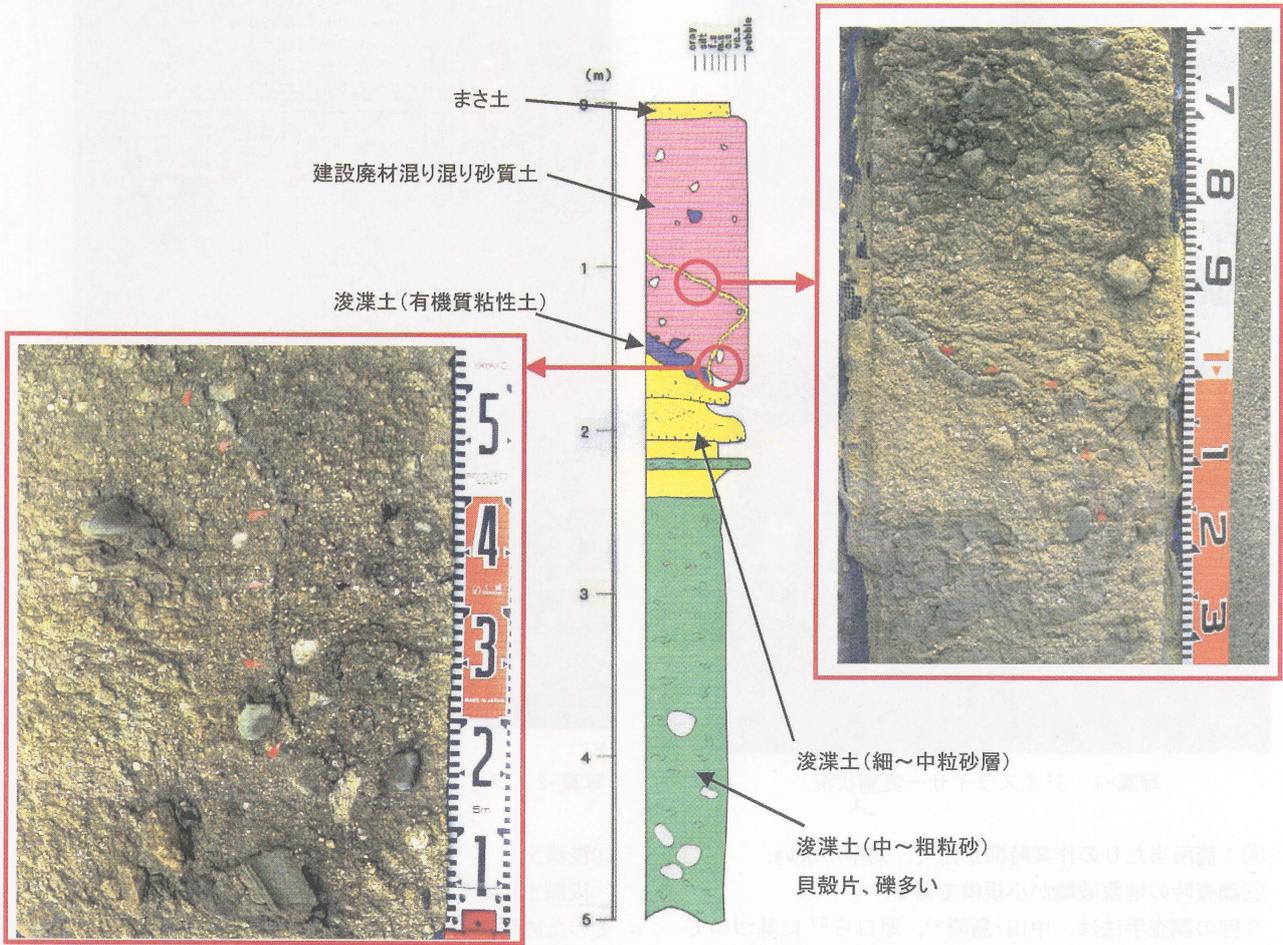


写真-3 ジオスライサー調査で確認した噴砂跡

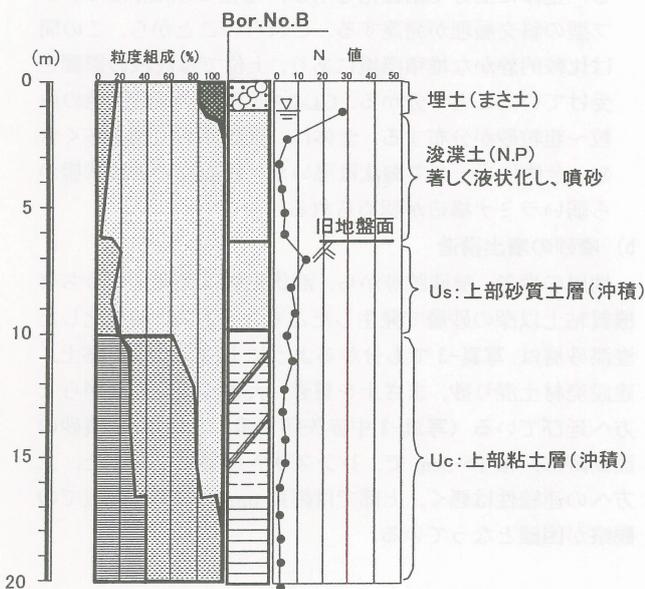


図-5 ボーリング調査結果

ーリング調査で得られた GL-20m までの柱状図を示す。この地点の地層構成は、上位よりジオスライサー調査でも確認された埋土時に用いられた埋土層(まさ土, 建設廃材混り砂, 浚渫土: Um), 上部砂層(Us), 粘土層(Uc, Lc), 下部砂層(Ls) が深く堆積し, その下位に工学的基盤である砂礫層(Lm) が堆積している状況にある。なお, 地下水位は GL-1.5m 付近の埋土層内で確認された。以下, GL-20m までの各地層の成層状況を示す。

①埋土層(Um)

地表から GL-6.6m の間は, 海岸埋立地造成時の埋土層で, この間は以下の3層分類される。GL-0.0~0.2m 間は褐色のまさ土, GL-0.2~1.5m 間は褐色の建設廃材混り砂質土で構成されている。この間の N 値は 28 で密実な状態にある。

GL-1.5~6.6m 間は, 暗灰色の中砂~粗砂を主体とする埋土時の浚渫土である。砂は, 深部に伴い粗粒砂が主体となる。ジオスライサー調査地点では, 貝殻片, 礫分を多く混入していたが, 当地点ではほとんど確認されなかった。この間の N 値は, 2~3 程度と非常に緩い状態に

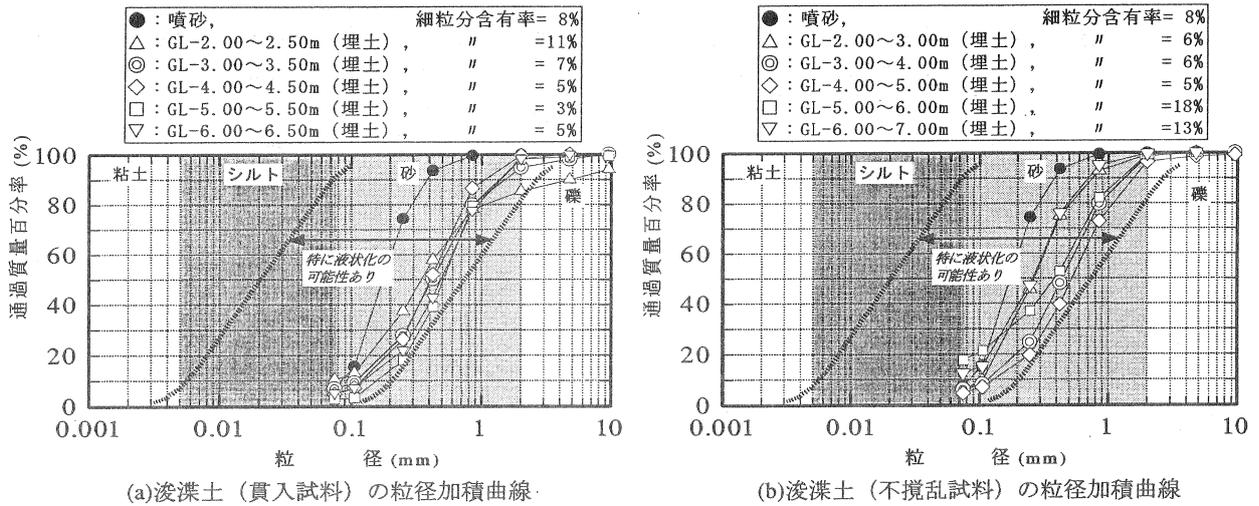


図-6 噴砂と浚渫土層の粒径加積曲線の比較

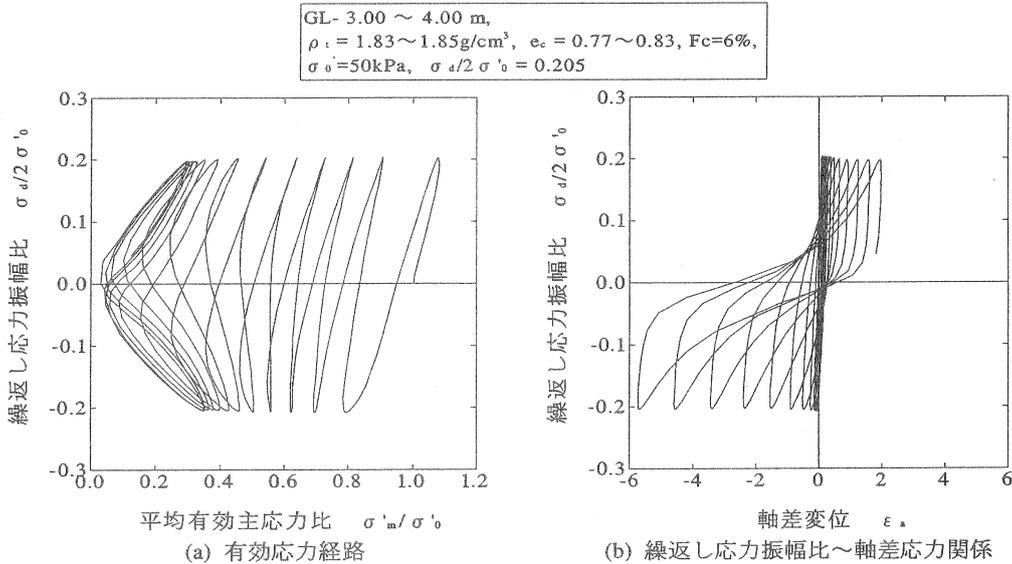


図-7 浚渫土の繰返し三軸試験結果の一例

あり、この浚渫土が液状化を起こした可能性が高い。

②砂層 (Us)

GL-6.6~9.8mの間は、暗灰色の中砂～粗砂在来の沖積砂層である。N値は10前後で浚渫土に比べ密実である。周辺の在来地盤では、液状化した痕跡がほとんど確認されていないことから当層が液状化を起こした可能性は低い。

③粘土層 (Uc)

GL-9.8m以深は、暗灰色の粘土層が深く堆積している。N値は2~3程度と軟らかく、塑性指数も30~50程度と高塑性であり、液状化した可能性はない。

図-6は、ボーリング調査時に液状化した可能性の高い浚渫土内で採取した試料を用いて実施した粒径加積曲線で

である。図中、(a)は標準貫入試験で得られた試料を対象に、また(b)はトリプルチューブサンプラーで採取した不攪乱試料を対象に行った結果である。図中には、当地で得られた噴砂の結果も併せて示している。この図より、噴砂の粒度と液状化を生じた可能性の高い浚渫土の粒度を比較すると、(a)、(b)ともに地中の浚渫土層の方が粗粒分が多いことがわかる。このことから、粗粒分が卓越している砂が噴砂として地表に噴出する場合、粗粒分がカットされる可能性があることを示唆しているといえる。したがって、粗粒分が多い砂の場合、噴砂が必ずしも液状化層の粒径を代表しない可能性があることに注意しなければならない。

(3) 液状化強度特性および液状化判定

トリプルチューブサンプラーで採取した浚渫土の不攪

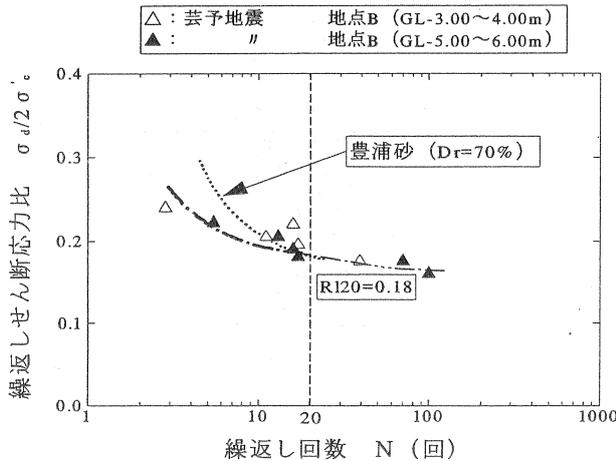


図-8 埋土層（浚渫土）の液状化強度

乱試料を用いて、非排水繰返し三軸試験を実施した。試験条件は、各深度の有効上載圧を等方圧密条件とし、周波数0.1Hzで行った。図-7に、代表試料の有効応力経路および繰返し応力振幅比～軸砂応力関係を示している。この図より、応力経路が原点に近づいてゆき、有効応力がゼロになった後、せん断応力が加わると大きなひずみが発生するというゆる詰め砂独特の挙動を示していることがわかる。

図-8に、繰返し軸ひずみ両振幅DA=5%に達するまでに必要な繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係を示す。なお、図中には比較のため豊浦標準砂(Dr=70%)⁶⁾の結果も併せて示す。これより、芸予地震で液状化した埋土層の液状化強度(RI20)はRI20=0.18程度で、豊浦標準砂(Dr=70%)の液状化強度とほぼ同程度であることを確認した。

4. まとめ

- (1) 液状化は、1947年以降の比較的若齢な海岸埋立地に集中していた。
- (2) 採取した噴砂の粒度範囲は、過去の地震と比べると広範に分布していた。
- (3) 噴砂の粒度と地盤中の粒度を比べると、噴砂の粒度は地盤中の粒度のうち粗粒分がカットされた形状を示していた。
- (4) 当該地区で液状化した層の液状化強度(RI20)はRI20=0.18程度で、豊浦標準砂(Dr=70%)の液状化強度とほぼ同程度であることを確認した。

参考文献

- 1) 網干寿夫：広島埋立史，土と基礎，Vol.39，No.1，pp.46-50，1991。

- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 3) 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，Vol.39，No.2，pp.17-22，1991。
- 4) 中田 高，島崎邦彦：活断層研究のための地層抜き取り装置(Geo-slicer)，地学雑誌，Vol.106，No.1，pp.59-69，1997。
- 5) 原口 強，島崎邦彦，小島圭二，中田 高：地層抜き取り装置による軟弱地盤における定方位連続地層採取方法，土と基礎，Vol.46，No.2，pp.24-26，1998。
- 6) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説 第一回改訂版 一，2000。