

2000年鳥取県西部地震, 2001年芸予地震で 液状化が生じた地盤の諸特性

藤井照久¹・兵動正幸²・吉本憲正³・山本陽一⁴・伊東周作⁵

¹正会員 工博 復建調査設計株式会社 (〒732-0052 広島県広島市東区光町 2-10-11)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁴正会員 工博 三井建設株式会社 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

⁵正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 (〒567-0011 大阪市西区阿波座 1-11-14)

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震, 2001年3月24日に発生した芸予地震と, 中国地方では大きな地震が頻発している。著者らは, まずこれらの地震で生じた噴砂・噴泥を用いて物理試験を行い, その物理的性質の特徴について検討を行った。さらに, 噴砂・噴泥が生じた地盤を対象に, ボーリング調査, 不攪乱試料採取, 物理試験等を行い, 噴砂・噴泥が生じた地盤の諸特性について検討を行った。

Key Words : *earthquake, liquefaction, site investigation, liquefied sands and mud, grain size distribution*

1. まえがき

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震において, 米子市から境港市に至る半島部分を中心に大きな液状化被害が発生した。また, 2001年3月24日に発生した芸予地震においても竹原から廿日市に至る沿岸部を中心に液状化被害が発生した。著者らは, まず両地震後に現地にて採取した噴砂・噴泥を用いて物理試験を行い, その物理特性について検討を行う。さらに液状化が生じた代表地点を対象に, ボーリング調査, 不攪乱試料採取, 物理試験等を実施し, 噴砂・噴泥が生じた地盤の諸特性について検討を行う。

2. 噴砂・噴泥の特性

(1) 鳥取県西部地震の噴砂・噴泥の特性

鳥取県西部地震では, 境港市, 米子市等を中心に多くの場所で液状化が発生した。特に, 1980年以降に開発された若齢な海岸埋立地に集中して発生している。

図-1は, 境港市, 米子市, 安来市, 東出雲市において, 採取した噴砂・噴泥の位置を示したものである。図-2に採取した試料の粒度試験結果を示す。なお, 図中には港湾基準¹⁾の中で, 「特に液状化の可能性があり」と示されている範囲も併せて示す。この図より, A, B, Jの3地点を除いた噴砂は「特に液状化の可能性あり」の中心部付近に位置し, 液状化しやすい土であったことがわかる。一方, A, B, Jの3地点の噴泥は, 「特に液状化の可能性あり」の範囲から左側に外れ,

大半が微細なシルトで構成されていることがわかる。これらの3地点は, 図-1の位置図からも明らかなように中海側の海岸埋立地ではなく, 美保湾側の海岸埋立地である。したがって, 液状化した土は, その物理特性から, 大きく中海側と美保湾側とで分類できそうである。

ここでは, さらに細粒分が卓越している美保湾側の噴泥を対象に, 液性・塑性限界試験を実施した。その結果, 美保湾側の噴泥の塑性指数(Ip)はNP~22であった。このIp=22という値は, 「建築基礎構造設計指針」²⁾, 「道路橋示方書」³⁾では液状化対象土からはずされている値である。

(2) 芸予地震の噴砂の特性

芸予地震では, 竹原市から廿日市市に至る沿岸部を中心に液状化の発生を確認した。この沿岸部周辺は, 1600年代より干拓開発が行われているが, 今回液状化が発生したのはこのうち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る。

図-3は, 広島市, 廿日市市において採取した噴砂の位置を示したものである。図-4に採取した試料の粒度試験結果を示す。この図より, D地点を除いた3地点の噴砂は「特に液状化の可能性あり」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(目視ではマサ土のように見えた)で構成されていることがわかる。全体の粒度分布を鳥取県西部地震と比較すると, 鳥取県西部地震では中海側と美保側の二箇所では分類できるのに対し, 芸予地震で採取された噴砂の粒度分布は各地点でその形状が異なり,

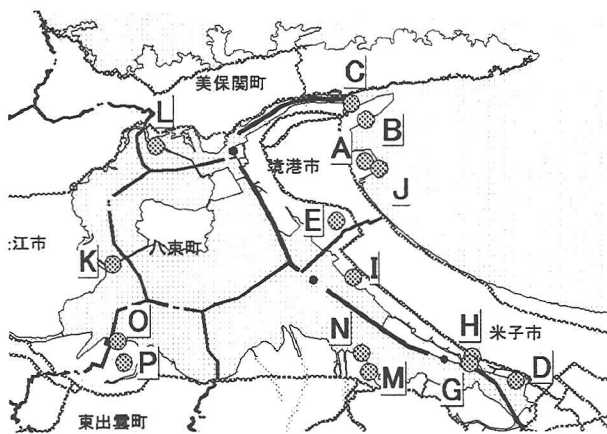


図-1 噴砂・噴泥採取位置図（鳥取県西部地震）

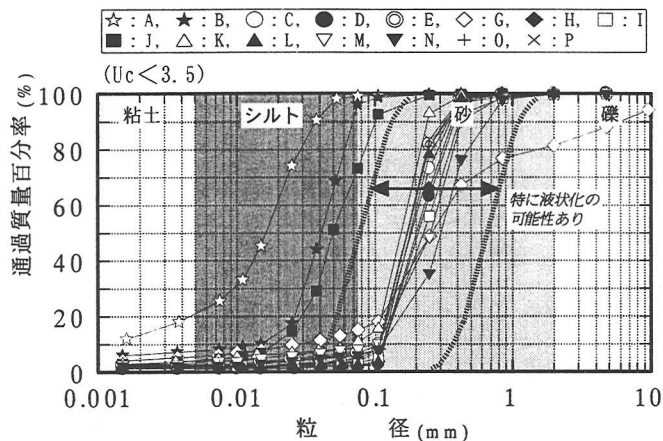


図-2 採取した噴砂・噴泥の粒径加積曲線（鳥取県西部地震）



図-3 噴砂採取位置図（芸予地震）

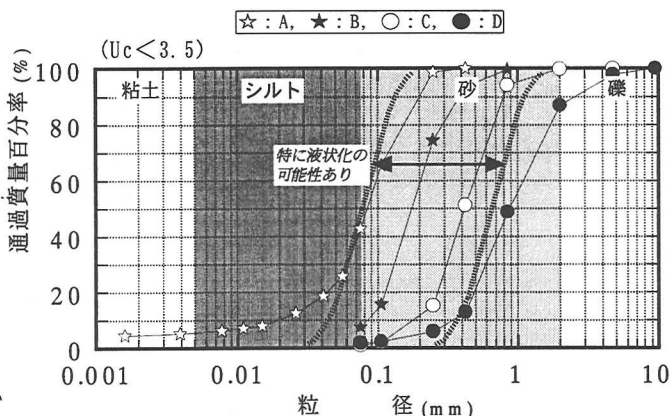


図-4 採取した噴砂の粒径加積曲線（芸予地震）

粒度が広範囲に分布していることがわかる。

(3) 平均粒径

図-5 は過去に森ら⁴⁾によって調べられた噴砂の平均粒径 (D_{50}) の範囲に、今回の地震で確認した噴砂の平均粒径の範囲を加筆したものである。この図より鳥取県西部地震の中海側の平均粒径の範囲は、森らが海岸埋立地を対象に調査した平均粒径範囲の右側（つまり粗粒側）に位置し、美保湾側の範囲は森らのものの左側（細粒側）よりさらに粒径が小さいことがわかる。一方、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ていることが確認された。

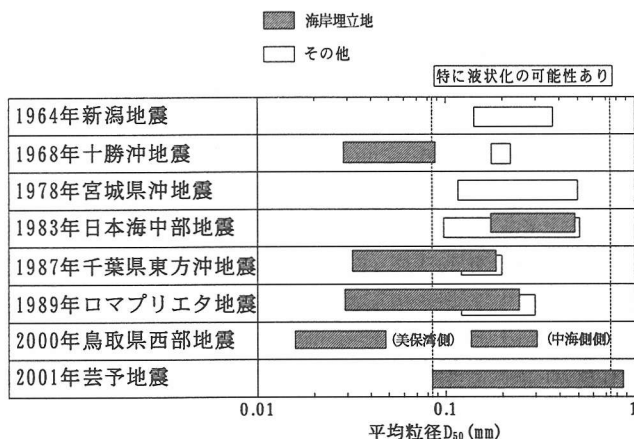


図-5 過去の地震で生じた噴砂の平均粒径との比較
(森ら⁴⁾の結果に加筆)

3. 液状化が発生した地盤の諸特性

(1) 鳥取県西部地震で液状化が生じた地盤の物理特性

鳥取県西部地震でボーリング調査を実施したのは、図-1に示す美保湾側に面したA、Bの2地点である。このうち、A地点が竹内団地内、B地点が昭和南岸壁の背後地で実施した。図-6に各調査地点のボーリング調査結果を示す。なお、図-6中には、ボーリング時に採取した攪乱および不攪乱試料を用いて実施した物理試験結

果のうち、各深度の粒度組成の結果も併せて示している。竹内団地内のA、B地点の地層構成は、上位より埋立時に用いられた埋土（浚渫土）が12～13m程度、それ以下に埋立前の表層地盤である沖積の砂質土層（ U_c ）が3m程度、さらにその下位に洪積の粘土層（ L_c ）が厚く堆積している状況にある。埋土は、大半がシルトで構成されており、所々に砂分を多く含む層を挟んでいる。一方、昭和南岸壁のB地点の地層構成は、埋立が8m程度、それ以下に U_c 層が1m程度、さらにその下位に L_c 層

が厚く堆積している状況にある。C地点の埋土も、大半がシルト層により構成されており、粘土分も全体に20%程度含まれていることが確認された。

図-7 は、ボーリング時に採取した各地点の埋土層の粒径加積曲線である。図中には、比較のため地震後に採取した各地点の噴砂・噴泥の粒径加積曲線（図中：●）も併せて示している。また、図中の破線は、港湾基準で「特に液状化の可能性があり」とされている範囲を示している。なお、破線の形状が図-2 と異なるのは、噴砂・噴泥の均等係数（ U_c ）はほとんどが $U_c \leq 3.5$ であったのに対し、現地盤内の試料はほとんどが $U_c > 3.5$ 以上であったため、「特に液状化の可能性あり」の範囲を変えている¹⁾。まず、A地点では GL-5m 付近までの粒径加積曲線（図中：△、○）は、噴砂・噴泥の粒径加積曲線と非常に類似していることがわかる。したがって、この区間の埋土が地震時に著しく液状化し、地表面に噴き上がってきた可能性が高い。この区間の塑性指数は、 $I_p = NP \sim 22$ 程度で噴砂の塑性指数（ $I_p = 22$ ）とほぼ同程度であった。GL-5m 以深の粒径加積曲線（図中：◇、□）は、噴砂・噴泥の粒径加積曲線とは異なり、特に GL-7m 以深の埋土（図中：□）は塑性指数が $I_p = 30\%$ 以上あることから、液状化した可能性そのものが低いと考えられる。B地点では、GL-7m 付近までの粒径加積曲線（図中：△、○、◇、□）が、噴砂・噴泥の粒径加積曲線と類似している。したがって、この区間の埋土が噴き上がってきた可能性が高い。この区間の塑性指数は、 $I_p = NP \sim 20$ 程度で、噴砂・噴泥の塑性指数（ $I_p = NP$ ）と比較すると全体にやや大きな値を示した。

以上のことを総合すると、美保湾側で確認された細粒分を多く含む噴砂・噴泥は、比較的浅層部（GL-7m 以浅）の埋土層が著しく液状化し、噴き上げた可能性が高いことが確認された。

(2) 芸予地震で液状化が生じた地盤の物理特性

芸予地震でボーリング調査を実施したのは、図-3 に示す広島湾に面した出島地区（B地点）である。図-8 に調査地点のボーリング調査結果を示す。B地点の地層構成は、上位より埋立時に用いられた埋土（浚渫土）が 6.5m 程度、それ以深に在来地盤である沖積の砂層（ U_s ）が 3.5m 程度、さらにその下位に粘土層（ U_c, L_c ）が約 20m 程度堆積している状況にある。

図-9 は、ボーリング時採取した試料を用いて実施した埋土層内の粒径加積曲線である。図中には、比較のため噴砂の結果も併せて示している。この図より、GL-6.5m 付近までの埋土層の粒径加積曲線は噴砂の粒度よりやや粗粒分が卓越しているものの、比較的その形状は類似していることがわかる。埋土層内の N 値（ $=2 \sim 3$ 程度）は在来の N 値（ $6 \sim 11$ 程度）と比較してかなり小さいことから、今回の芸予地震によってこの埋土層が著しく液状化し、地表面に噴き上がってきた可能性が高い。

(3) 液状化強度特性

採取した各地点の埋土層の不攪乱試料を用いて、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-10 に軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ 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。この図より、鳥取県西部地震の美保湾側の埋土層の液状化強度（ RI_{20} ）は、 $RI_{20} = 0.22 \sim 0.24$ 程度、芸予地震で液状化した埋土層の RI_{20} は、 $RI_{20} = 0.18$ 程度と、どちらの液状化強度もかなり低い値であることを確認した。

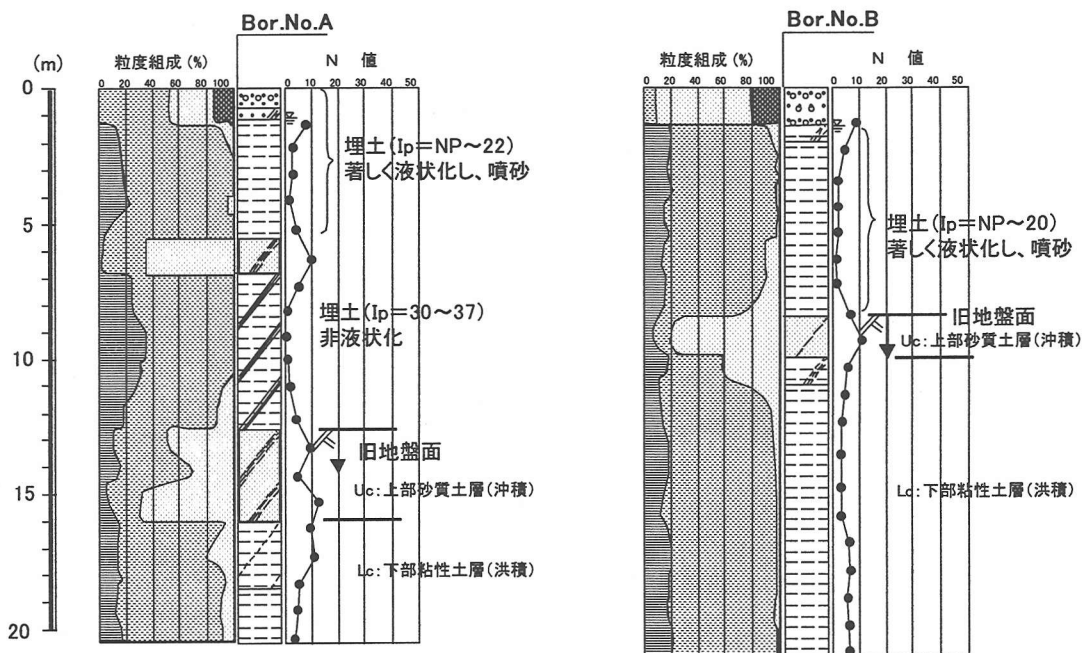


図-6 各地点の地盤状況（鳥取県西部地震）

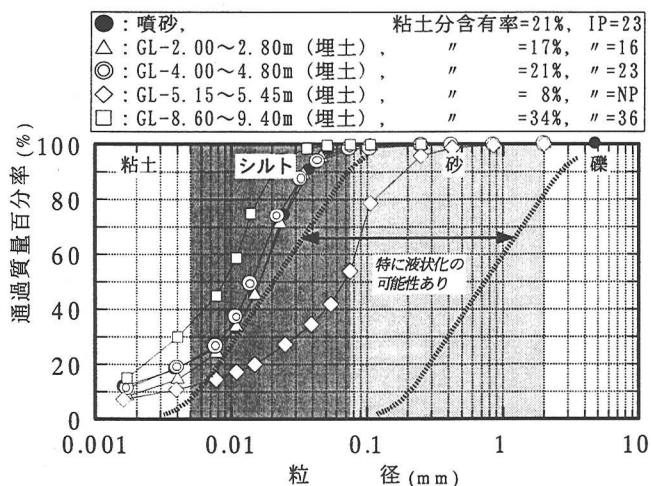


図-7(a) A地点の粒径加積曲線 (鳥取県西部地震)

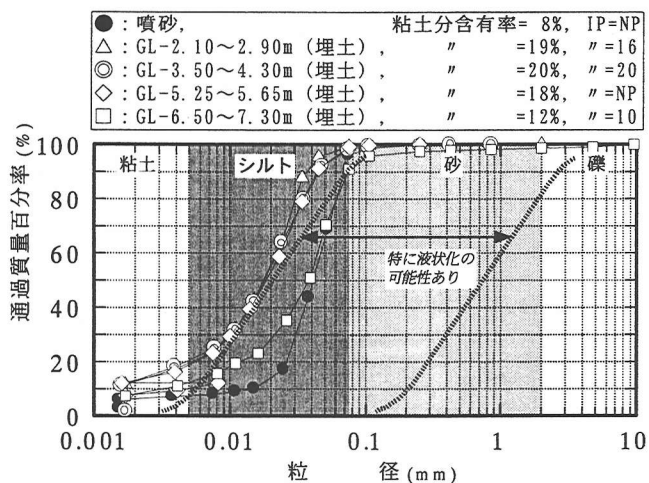


図-7(b) B地点の粒径加積曲線 (鳥取県西部地震)

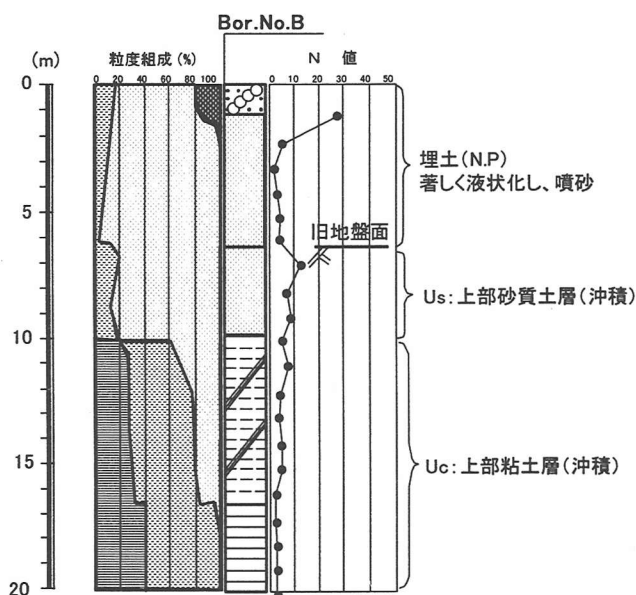


図-8 B地点の地盤状況 (芸予地震)

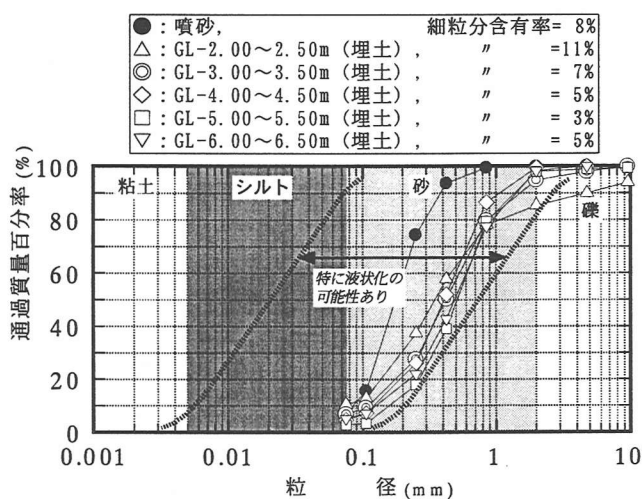


図-9 B地点の粒径加積曲線 (芸予地震)

4. まとめ

採取した噴砂・噴泥は、鳥取県西部地震では大きく中海側と美保湾側に分類されるが、芸予地震では場所によって粒度分布状況が異なることを確認した。

また、ボーリングの結果と噴砂を比較することにより、液状化発生領域は、鳥取県西部地震、芸予地震ともに埋土層の浅層部であることを確認した。なお、その液状化強度は、鳥取県西部地震では $RI_{20}=0.22\sim0.24$ 程度、芸予地震では、 $RI_{20}=0.18$ 程度と、どちらの液状化強度もかなり低い値であった。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999。
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、1988。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編、1996。
- 4) 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。

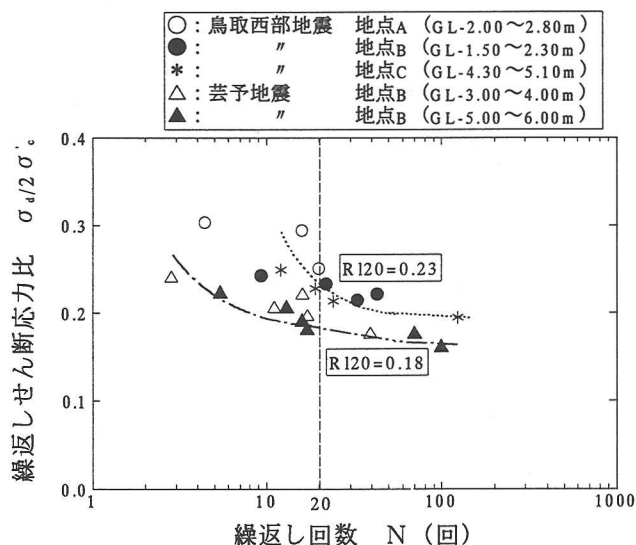


図-10 各地点の液状化強度