

2000年鳥取県西部地震で液状化したシルトの 液状化強度と物理特性の関連について

山本陽一¹・兵動正幸²・吉本憲正³・藤井照久⁴・伊東周作⁵

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

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

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丁目 11-14)

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震では、米子市から境港に至る半島の海岸埋立地を中心に大規模な液状化が生じた。著者らは、細粒土を多く含む噴砂・噴泥が生じた美保湾側の埋立地においてボーリング調査と不攪乱試料採取を行い、採取した試料に対して一連の物理試験および繰返し三軸試験を実施した。本報告ではこれら細粒分を多く含んだ土の液状化強度（繰返しせん断強度）と物理特性との関係を整理し、液状化の発生が懸念される細粒土の物理特性について既往の試験結果を交えて考察した。

Key Words : clay contents, cyclic triaxial test, liquefaction, plasticity index, silt

1. はじめに

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震では、米子市から境港に至る半島の海岸埋立地を中心に大規模な液状化が生じた。液状化を生じた地点の噴砂・噴泥の粒度組成は半島西側の中海側と東側の美保湾側で大きく異なり、前者が均等係数の小さいいわゆるきれいな砂であったのに対して、後者の大部分はシルトあるいは粘土に分類される試料であった¹⁾。後者の美保湾側で採取された噴泥の中には塑性指数が20を越えるものもあり、これは既往の指針類では液状化の対象から除外される試料である。液状化により地表に噴出した試料が必ずしも液状化を生じた試料そのものであるとは言い切れないが、このことは細粒分を多く含む土の液状化の評価・検討を行う上で今後慎重な対応を必要とすることを示唆していると考えられた。

そこで、著者らは細粒土を多く含む噴砂・噴泥が確認された美保湾側の埋立地において、ボーリング調査と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繰返し三軸試験を実施した²⁾。本報告では、噴砂・噴泥と埋土の物理特性の比較、採取した不攪乱試料の液状化強度（繰返しせん断強度）と物理特性との関係を既往の細粒土に対する試験結果³⁾を交えて考察することにより、液状化の発生が懸念される細粒土の

物理特性について議論する。

2. 調査地点の概要

ボーリング調査は本震発生の2ヵ月後、図-1に示す美保湾側に面した竹内工業団地内のA、B地点と昭和南岸壁背後地のC地点の3箇所において実施した。いずれのボーリング地点も、地震後直ちに行った調査において細粒分を多く含む噴砂・噴泥が数多く確認され、著しく液状化していると推定された地点であり（写真-1）、地震調査時には同地点において噴砂・噴泥試料を採取している。

図-2に調査地点のボーリング調査結果を示す。図には、ボーリング時に採取した試料から求めた各深度の粒度組成の結果も併せて示している。

竹内工業団地内の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、それ以深に埋立前の表層地盤である沖積の砂質土層（Uc）が3m程度、さらにその下位に洪積の粘土層（Lc）が堆積している。埋土の大半はシルトで構成されており、GL-6m付近に砂分を多く含む層を挟んでいるのが特徴である。昭和南岸壁のC地点の地層構成は、埋土が8m程度でそれ以深に旧地盤面であるUc層が1m程度、さらにその下位にLc層が厚く堆積している。また、C地点の埋土もシルトを主体とする層により構成されている。

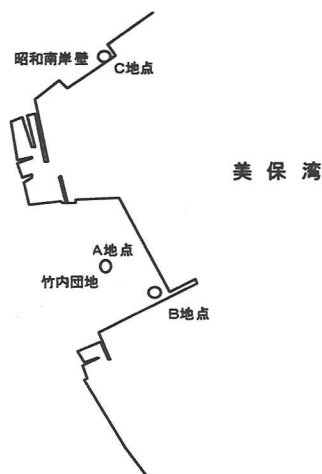


図-1 調査位置

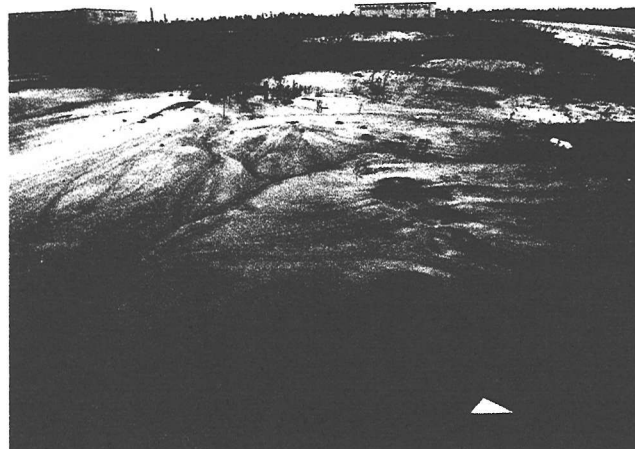


写真-1 地表に噴出したシルト (A 地点)

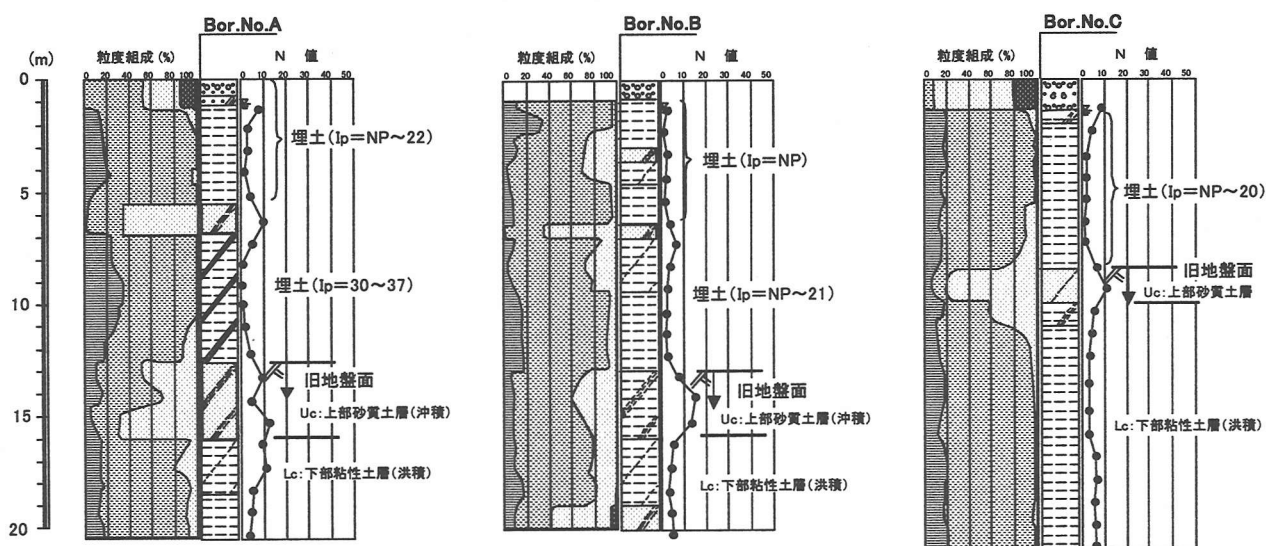


図-2 調査地点の地盤状況

3. 埋土の物理特性

図-3 に、A、B、C 地点の埋土層および噴泥の塑性指数 I_p と粘土分含有率 C_c の関係を示し比較した。A 地点と B 地点については、採取した噴泥の中に砂分がほとんど含まれていなかったことから、中間の砂層を境として上部の埋土層と下部の埋土層でプロットを分けて比較した。

まず、噴泥の粘土分含有率は約 20%以下で、塑性指数は NP~約 20 の範囲にある。噴泥の結果が今回液状化を生じた試料の物性を表しているとするならば、この範囲が液状化の可能性を示す目安となる。

A 地点では、GL-1.15~5.45m の上部埋土層の物性がこの範囲内にあるのに対して GL-7.0~12.4m の下部埋土層の物性はこの範囲を超えた位置にプロットされていることが分かる。したがって、A 地点では上部埋土層シルト地震が液状化して地表に噴き上がってきた可能性が高く、下部埋土層では液状化を生じていないと推察される。

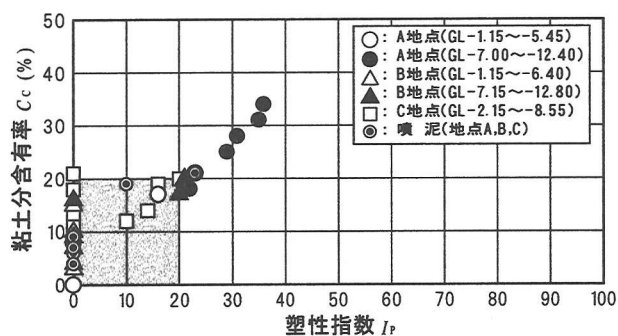


図-3 埋土層および噴泥の塑性指数と粘土分含有率の関係

B 地点では、上部埋土層 (GL-1.15~6.40m) と下部埋土層 (GL-7.15~12.80m) のいずれもが粘土分含有率約 20%以下、塑性指数約 20 以下の範囲内に存在しており、両層での液状化の可能性が考えられる。ただし、上部埋土層の塑性指数が NP となっていること、一般には塑性の低い場合の方が液状化しやすいと考えられることから、上部埋土層の方が液状化の程度は激しいと推察される。

C 地点では、旧地盤面より上の表土を除く埋土層全層での液状化の可能性が、粘土分含有率と塑性指数の物性から考えられる。

4. 繰返しせん断強度と諸物性との関連

図-4 に、A, B, C 地点で採取した埋土層の不攪乱試料に対する繰返し三軸試験結果として、軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{DA}=5\%$ に至るに必要な繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を示す。試験は各深度の有効上載圧を拘束圧として等方圧密を行った後、非排水条件で 0.1Hz の正弦波を繰返し応力として载荷している。図から繰返し回数 $N=20$ 回における繰返しせん断応力比 R_{20} を読み取ると概ね 0.22~0.25 程度となっており、周辺で観測された本震時の地表面最大加速度の大きさ（約 300gal）を考えると、液状化の発生が十分考えられる範囲の強度であると言える。

次に、図-4 から求めた埋土層の繰返しせん断強度を物理特性と関連付けて考察するために、著者が先に実施した種々の細粒分含有率からなる室内配合および不攪乱試料に対する試験結果³⁾を交えて整理する。

既往の試験結果³⁾は、砂から粘土へと細粒分および粘土の混入により変化していく挙動の変化を、非排水静的三軸試験結果から図-5 に示す3タイプに集約される形で分類している（このタイプ分けでは軟化挙動を示す緩い砂は考慮していない）。タイプ①の有効応力経路は変相後に初期拘束圧を越える大きな膨張傾向を示す中密な砂質土の典型的な挙動である。細粒土の混入量が大きくなるほど収縮傾向が強まり、タイプ②、そして正規圧密粘土の典型的な挙動であるタイプ③と分類された。

図-6 には、タイプ①、②、③と区分を行った試料に対する既往繰返し試験³⁾の有効応力経路を示した。タイプ①の試料は、過剰間隙水圧が最終的に初期拘束圧まで上昇して液状化に至っていることが分かる。これに対して、タイプ②、③となるにつれて原点から離れた位置で定常な状態に至っていることが明らかである。

図-7 には、埋土層に対する繰返し三軸試験から得られた代表的な有効応力経路を示したが、 $I_p=31$ の結果が前出のタイプ③に $I_p=14$ の結果がタイプ②の挙動に類似していることが分かる。この他の試料に対する埋土の有効応力経路は NP も含めていずれもタイプ②に類似しており、変相は生じるがタイプ①のように過剰間隙水圧が最終的に初期拘束圧に一致するまで上昇することはなかった（ただし、NP 試料の再構成試料に対する試験結果¹⁾からはタイプ①の挙動が確認されている）。したがって、埋土不攪乱試料の有効応力経路からは、明確に液状化が生じると判断するには至らなかった。

図-8、図-9、図-10 に、それぞれ図-4 から求めた埋土

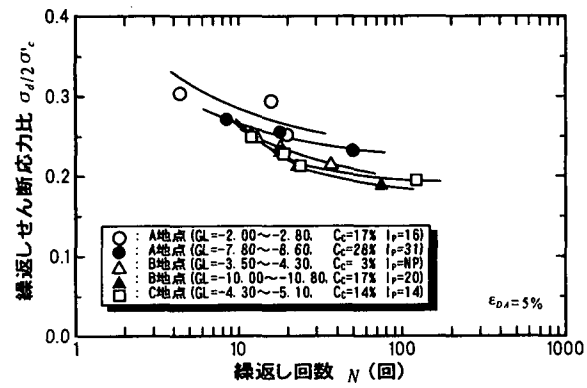


図-4 埋土層の繰返し強度曲線

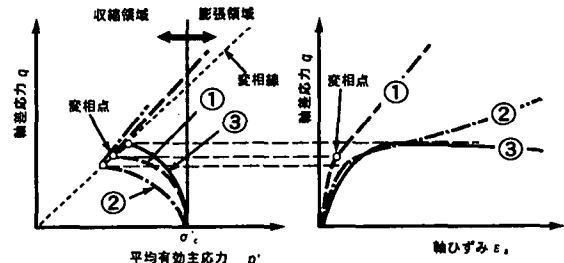


図-5 単調せん断挙動のタイプ³⁾

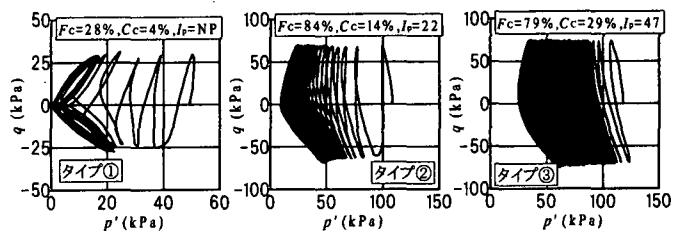


図-6 各タイプの有効応力経路（伊東他）³⁾

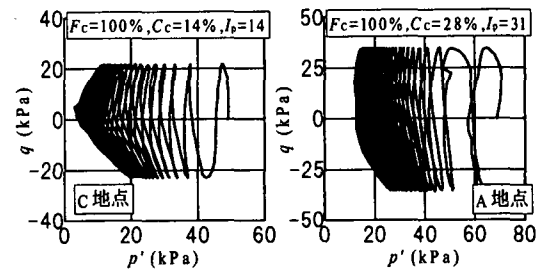


図-7 埋土層の有効応力経路

層 $N=20$ 回における繰返しせん断強度 R_{20} と細粒分含有率、粘土分含有率、塑性指数に対する関係を、既往の試験結果³⁾を交えてまとめた。

図-8 の関係から、 F_c の増加により概ね R_{20} は高くなる傾向が認められるが、全体にバラツキが大きく鳥取試料については $F_c=100\%$ に集中していることもあり既往の試験結果との相関は認められない。また、既往試験結果それぞれのタイプを F_c で区分できないことが分かる。

図-9 に示す粘土分含有率との関係を見ると、各タイプの相関が F_c にくらべて大幅に向上しており、 C_c による

タイプ分けの可能性を示している。また、既往の試験結果と鳥取試料についても良い対応が認められる。

図-10 では図中破線で正規圧密粘土に対する著者らの提案式⁴⁾による結果も表示しているが、タイプ①を除いてこの提案式にほぼ一致する形で既往の試験結果と鳥取試料の結果がプロットされているのが分かる。

ここで、図-9 の関係においてタイプ①とタイプ②とを分ける $C_c=5\%$ は、既往試験試料の砂骨格の間隙が細粒土で満たされた状態 ($F_c=15\%$) に相当しており³⁾、タイプ①に分類された試料の塑性指数はすべて NP となっている。このことと、図-9、図-10 で認められた良好な対応関係から、これ以上の粘土分含有率 ($C_c=5\%$) あるいは細粒分含有率 ($F_c=15\%$) を有する試料の繰返し強度は細粒土 (粘性土) の性質 (粘土分含有率、塑性指数) に応じて増加することが理解される。

表-1 に、現行の指針類における細粒土側の液状化対象土の範囲についてまとめた。指針により若干の違いはあるが、細粒分含有率については 35% 以下、粘土分含有率では 10~15% 以下、塑性指数については 15 以下を液状化対象土として取り扱っている。図-8~図-10 に示した関係を現行の指針類に対応させると、細粒分含有率については明確ではないものの、粘土分含有率と塑性指数から既往の試験結果のタイプ①は無論であるがタイプ②のような土についても液状化の対象に含めていることが分かる。逆に、タイプ③は液状化の対象から除外されていることが分かる。

図-3 に示した埋土層と噴泥の粘土分含有率・塑性指数関係の比較から、粘土分含有率 $\leq 20\%$ 以下、塑性指数 ≤ 20 以下の範囲で液状化の可能性が考えられ、これは図-9、図-10 で示されるタイプ①とタイプ②の範囲とほぼ一致している。また、A 地点の下部埋土層に相当する A 地点 (GL-7.8~8.6m) が液状化対象外となるタイプ③とみなせること、その他の埋土層の結果が既往の試験結果タイプ②と良い一致を示していること等から、今回の地震では概ね粘土分含有率 20% 以下、塑性指数 20 以下の範囲の埋土層が液状化を生じたと判断される。

5. まとめ

噴泥と埋土の物理特性の比較、採取した不攪乱試料の液状化強度 (繰返しせん断強度) と物理特性との関係を既往の細粒土に対する試験結果を交えて整理することにより、以下のことが分かった。

- 1) 細粒土の繰返しせん断強度は粘土分含有率と塑性指数に対して良好な対応関係がある。
- 2) 概ね粘土分含有率 20% 以下、塑性指数 20 以下の範囲の埋土層上部で液状化が生じたと考えられた。

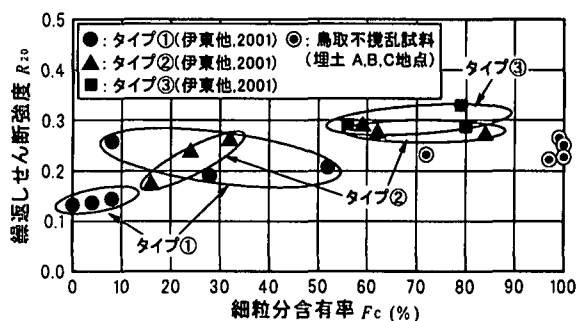


図-8 繰返しせん断強度と細粒分含有率の関係

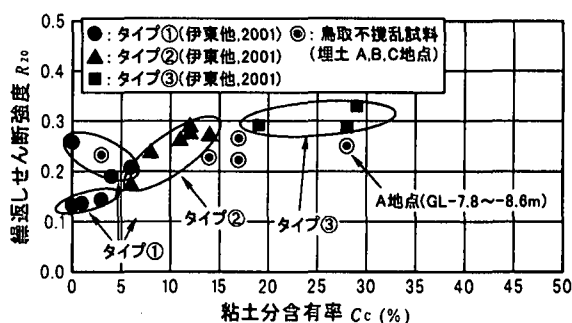


図-9 繰返しせん断強度と粘土分含有率の関係

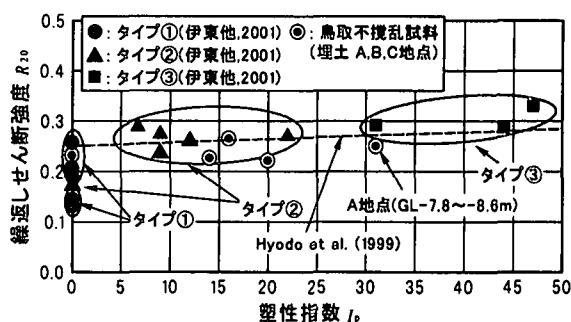


図-10 繰返しせん断強度と塑性指数の関係

表-1 各基準の液状化対象土 (細粒土側)

指針・基準名	細粒分 F_c	粘土分 C_c	塑性指数 I_p
道路橋 (1996)	35% 以下	-	15 以下
鉄道 (1999)	35% 以下	15% 以下	-
建築 (1988)	35% 以下	10% 以下	15 以下

参考文献

- 1) 吉本憲正, 兵動正幸, 藤井照久, 山本陽一, 伊東周作: 2000 年鳥取県西部地震で生じた噴砂・噴泥の諸特性, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, 2001.
- 2) 藤井照久, 藤本睦, 若槻好孝, 兵動正幸, 吉本憲正: 2000 年鳥取県西部地震で噴砂・噴泥が生じた地盤の諸特性, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, 2001.
- 3) 伊東周作, 兵動正幸, 藤井照久, 山本陽一, 谷口聡一: 砂・粘土・中間土の非排水単調及び繰返しせん断特性, 土木学会論文集, No.680/III-55, 2001.
- 4) Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Yamamoto, Y. and Fujii, T.: Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp.45-58, 1999.