

III - A83

ポートアイランドまさ土の上昇間隙水流による不安定化の条件

中央大学 正 國生 剛治  
学○藤倉 裕介

1. まえがき

兵庫県南部地震(1995年)でのポートアイランドなど埋め立て地盤の液状化による大規模な被害は礫分を30~60%も含んだまさ土からなる礫質地盤の液状化という問題を提起した。このような礫質土は均等係数が大きな土質で、地上への噴出はほとんどの場合、礫質土のマトリクスを構成する細粒の砂やシルトであった。また、液状化後の地盤はかなり沈下したが、地表面の平坦度はほとんど失われなかった。本研究ではこれらの点に着目し、地震による過剰間隙水圧が上昇した後で、逸散時の間隙水流による礫質地盤の挙動を明らかにする目的で、任意の水位を設定できる定水位透水試験器を作製し、上昇流により礫質土が不安定化するメカニズムを調べるための実験を行った。ここでは、まさ土を中心に行った試験により現在までに得られた結果について述べる。

2. 実験装置と実験材料

実験装置の概略は、図1に示すようなものである。試料を入れる円筒は透明アクリル樹脂製のもので、内径200mm、長さ400mmである。円筒には、透水試験時の水頭差 $h$ を測定するためのピエゾメータが5本付いている。通水管上部の給水部と透水円筒上部の越流部は二重構造とし、試験中は水をオーバーフローさせて水位を一定に保つようにした。フィルター部は、多数の穴の開いたアクリル板と金網、ろ紙を用いた。供試体上部より流出した粒子は試験終了後に回収して分析を行った。図1のように設置した装置において給水部を50mmごと上方に上げ、水位を変化させて透水試験を行った。測定は段階ごとに約20~30分間隔で行い、同時に供試体内の変化の様子を観察した。動水勾配( $i = h/L$ )は図1のようにそれぞれのピエゾメータの読みと越流部自由表面高さとの差を $h$ 、供試体上面からそれぞれのピエゾメータまでの距離を $L$ としてそれぞれ求め、平均化したものを採用した。

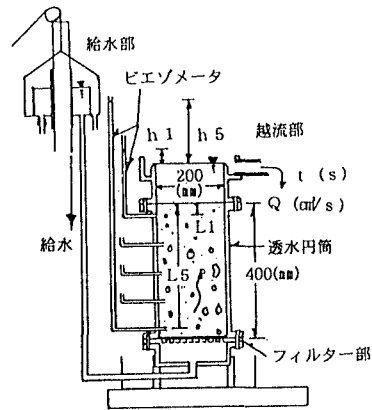


図1 定水位透水試験装置

試験に用いたポートアイランドまさ土の2種類の粒土分布(水洗いにより細粒分を厳密に測定した場合と水洗い無しで礫への細粒分の付着を許した場合)は、図2に示してある。この試料は土粒子密度2.622(g/ml)である。供試体は、乾燥試料を用いて円筒を何層かに分け、木槌による水平打撃を行って密度を調整し作製した。

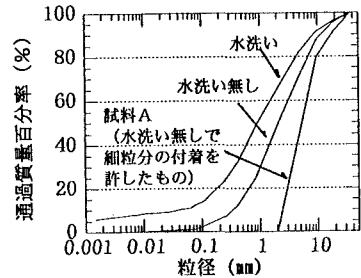


図2 まさ土 粒径加積曲線

3. 試験結果と考察

図3はまさ土について得られた流速と動水勾配の関係を示している。グラフ上の●印は細粒分の移動が初めて見られた箇所、★印は限界状態に至った箇所を示す。特にゆる詰めの場合では限界動水勾配理論値( $ic = \gamma' / \gamma_w$ )に達するかなり以前に細粒分が不安定化しパイピングを生じ始める。また動水勾配の増大とともに流速は逆S字カーブを描きながら増加し、限界動水勾配を越えてもポイリングのような全体的な不安定化は生じず、大きな礫の骨格は安定したままである。これらの観察や供試体からの流出分に関してはすでに報告したとおりである。

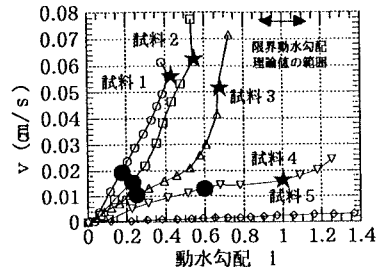


図3 まさ土の  $i$  と  $v$  の関係

キーワード: 液状化・浸透・まさ土・礫

連絡先: 〒112 東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部 TEL (03)-3817-1793 FAX (03)-3817-1803

図4はまさ土の不安定化における限界動水勾配実験値 $i_c, i_{cf}$ （ $f$ は細粒分の移動を表す。）とその時のそれぞれの限界流速 $v_c, v_{cf}$ の関係を表したものである。このグラフは、細粒分の移動はある程度の流速（ $v_{cf} < 0.02 \text{ cm/s}$ ）以下で生じているということを示している。つまり細粒分の移動は試料の密度に関係なく、ある空隙内で自由になっている細粒分はある流速に達すれば生じる。

図5はまさ土のそれぞれの試料における空隙比とその試料の $i_c, i_{cf}$ の関係を表したものである。理論的にはグラフ上の実線の周辺にプロットされるはずであるが、これには沿わずに空隙比の増加に伴い、急激に減少する。また2本の点線はある幅をもち、細粒分の移動が起こる動水勾配と限界状態に対応した動水勾配には関係がある。

さて2mm以上の礫で水洗いを行っていない細粒分の付着を許したまま（ふるいは通した）のまさ土（図2の試料A）の試験を行った。その結果、内部で移動できる空隙スペースが十分に存在するにも関わらず、礫に付いた細粒分は最高ヘッド $i = 0.15$ （この試験装置の限界）を与えてもほとんど付いたままで運ばれなかった。細粒分が運ばれるための要素である浸透水の流速を考えると $i = 0.15$ の際には $v = 0.082 \text{ cm/s}$ であり、これは図4より、細粒分を運ぶためには十分な流速である。このことから、供試体からの流出の細粒分は主に礫分に着着したのではなく、ある空隙内で自由になっているものであると思われる。

以上の結果をKenney & Lau（1985年）によって提案された礫質土の不安定化の $H/F$ による判定条件チャートに示したものが図6である。すなわち、図の右上の図のような要領で粒度分布上に $F$ を5%ごとに考え、それに対応する $D, 4D, H$ を求め、 $F$ と $H$ の関係として表したものである。図中の黒丸と白丸の線は図2に示す水洗い前後のまさ土の粒度に対応している。2本の点線ではさまれたハッチした帯は彼らの提案による安定と不安定の境界を示している。図上の矢印は供試体上面から流出される粒径の粒度分布からの範囲（2mm以下）であり、 $F$ と $H$ の関係がこの範囲において水洗いの有無によらず限界直線より下にあり、まさ土において上記のような不安定化が生じる可能性があることを示していると思われる。さらに、Skempton（1994）はこのグラフ上の $H/F$ の最小値（ $H/F$ ）<sub>min</sub>と限界動水勾配の関係を示した。この図によるとまさ土は不安定（水洗い）または安定と不安定の中立ゾーン（水洗い無し）に位置すると判定される。ここで不安定とは細粒分の移動と流出、理論値よりも低い動水勾配でのパイピングによる限界状態化を意味している。

#### 4. 結論

(1)特にゆる詰めのみさ土では、砂とは異なり動水勾配が限界動水勾配に達するかなり以前に細粒分が不安定化しパイピングを生じ始める。(2)まさ土は限界動水勾配を越えてもボイリングのような全体的な不安定化は生じず、大きな礫の骨格は安定したままである。(3)粒径加積曲線から求めた $H/F$ の不安定化の判定条件より判断するとポートアイランドまさ土はゆる詰めの状態では地震時に完全液状化に対応した動水勾配（＝限界動水勾配）に達しなくてもパイピングによる噴砂が発生し、不安定化したと思われる。

最後に大量のまさ土を御提供いただいた不動建設（株）の各位に深謝の意を表します。

#### 参考文献

- (1)國生、藤倉（1997）ポートアイランドまさ土の上昇空隙水流による不安定化メカニズム、第32回地盤工学研究発表会  
 (2) Kenney, T. C. & Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. Can. Geotech. J. 22, 215-225. (3) Skempton, A. W. & Brogan, J. M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. Geotechnique 44, No. 3, 449-460

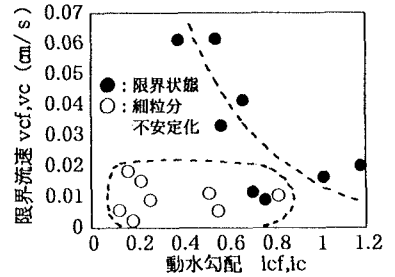


図4  $i_{cf}, i_c$ と $v_{cf}, v_c$

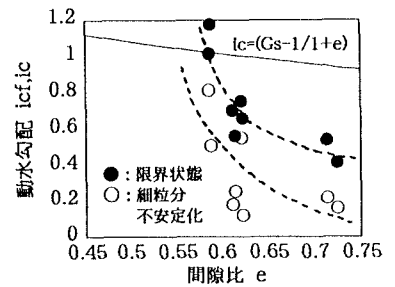


図5  $e$ と $i_{cf}, i_c$

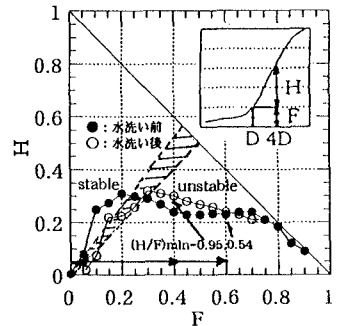


図6  $F$ と $H$ の関係