

海面埋立てにより形成される分級堆積構造に着目したまさ土の液状化実験

福岡大学 学生会員 本村毅 麻生茂樹
正会員 山田正太郎 佐藤研一

1. はじめに 阪神大震災ではまさ土で埋め立てられた地盤で甚大な液状化被害が生じた¹⁾。非常に粒度のよいまさ土では、液状化が生じにくいと考えられていたため、このことは大きな関心を集めた。その後、行なわれた多くの研究の中で後藤ら²⁾はまさ土による埋立て地盤は、埋立て方法によっては分級して堆積していることを、地盤内を掘削調査することで指摘した。粒度組成の違いは液状化特性に影響を及ぼすと言われるため、本研究では分級されることによってまさ土の液状化挙動がどのように変化するか調べる。

2. 実験試料 本研究では、太宰府まさ土を用いた。試料は三軸供試体の大きさの制約から 4.75mm 以下にふるい分けしたものを使用した。また、比較試料として豊浦砂を用いた。**図-1**に両試料の粒径加積曲線を示す。まさ土は粒径幅が広く、豊浦砂は粒径幅の狭い材料であることがわかる。

3. 非排水繰返し三軸試験

3-1 実験方法 供試体作製は、水中落下法により行った。供試体に脱気した海水を通水し、背圧 $\sigma_{BP}=196\text{kPa}$ を載荷し、供試体を飽和させた。B 値は 0.96 以上であることを確認している。拘束圧 $\sigma'_c=98.1\text{kPa}$ の下で 1 時間圧密した後、載荷速度 0.1Hz の正弦波で繰返し非排水せん断を行った。

3-2 液状化特性 豊浦砂とまさ土の液状化挙動を**図-2**、**図-3**に示す。両試料とも、繰返し荷重を受けるにつれ有効応力が減少し、サイクリックモビリティを示し液状化に至っていることがわかる。ここで、軸差応力-軸ひずみ関係に着目すると、まさ土の変形挙動は豊浦砂と顕著に異なっていることがわかる。豊浦砂は平均有効応力が 40kPa を過ぎたあたりで大きく低下し、その直後からサイクリックモビリティを描き始め、同時に大きなひずみが発生し始める。まさ土も最終的にサイクリックモビリティを描くが、豊浦砂のようにどこで描かれるようになったか特定することは難しい。ひずみが徐々に発展していく点も豊浦砂と異なる。次に、**図-4**に 1 回の繰返し載荷中に発生する最大の過剰間隙水圧比 $(u/p'_c)_{\max}$ と両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達したときの繰返し回数 $N_{f,5\%}$ で正規化した繰返し回数 $N/N_{f,5\%}$ の関係を、**図-5**に両振幅軸ひずみと正規化繰返し回数 $N/N_{f,5\%}$ の関係を示す。豊浦砂は最大間隙水圧比が 0.6 を過ぎたあたりで、間隙水圧が急激に上昇すると同時に、急激にひずみが発生し液状化に至っている。一方、粒径幅が広く、細粒分を多く含むまさ土は、繰返し初期の段階から軸ひずみと間隙水圧を緩やかに増加させながら液状化に至っていることが分かる。

4. まさ土の沈降特性

4-1 円筒土槽実験方法 海面投入時の沈降特性について調べるため、直径 ϕ_c 19cm、高さ H_c 200cmの円筒土槽実験装置を用いて沈降試験を行った。土槽内に海水を高さ 162.5cm まで満たした。まさ土 5kg に海水 4kg を混ぜ、含水比を約 80%に調整し、円筒土槽装置の上から用意した試料を投入し、3 時間放置した。

4-2 実験結果 まさ土の沈降終了時の堆積状況を**図-6**、分級堆積したまさ土の物理特性を表-1 示す。まさ土は、沈降時に著しい分級を生じていることが分かる。次に、堆積した試料を最上層、上層、中層、下層の 4 層に分け採取し物理特性を調べた。粒径加積曲線を**図-7**示す。分級させていないまさ土は粒径幅が広いのに対し、分級後は 4 層とも粒径幅が狭くなっていることがわかる。

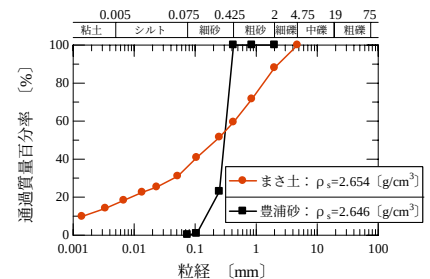


図-1 粒径加積曲線

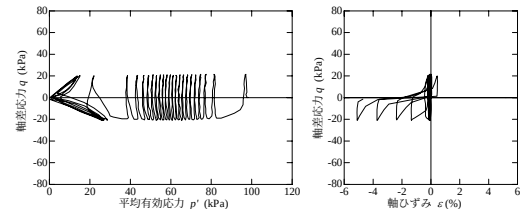


図-2 豊浦砂の液状化挙動

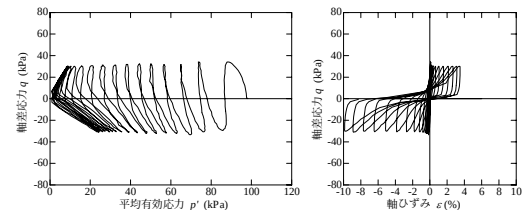


図-3 まさ土の液状化挙動

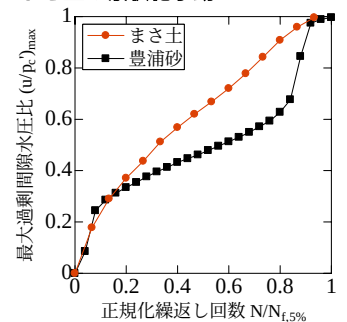


図-4 正規化繰返し回数
～最大過剰間隙水圧比関係

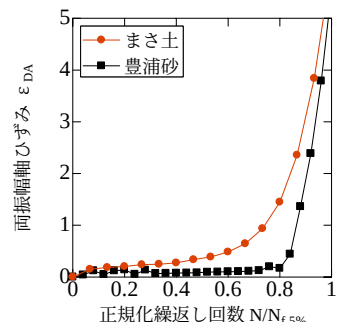


図-5 正規化繰返し回数
～両振幅軸ひずみ関係

5. 分級されたまさ土の液状化特性

分級され 4 層に分けた試料のうち、シルト分が大半を占める最上層を除く 3 層に対し液状化試験を行った。分級させていない試料同様、水中落下法によって供試体を作製した。実験は 1 層につき、繰返しせん断応力比を変化させて 4 本以上行った。各層のせん断時の平均間隙比を表-2 に、分級堆積したまさ土の液状化挙動を図-8 示す。これらは、すべてほぼ等しい繰返しせん断応力比($q_{cyc}/p_c' = 0.29$)を与えた場合の結果である。どの試料も繰返し回数増加に対し有効応力が徐々に低下し、サイクリックモビリティを示し液状化に至っていることが分かる。また、分級されていない場合に比べて、上層・中層においては、ほぼ同じ繰返し回数で液状化に至っているが、下層においてはやや強い傾向を示した。また、軸差応力・軸ひずみの関係に着目すると、分級されていないまさ土は徐々にひずみが発生し液状化に至るのに対し、上層・中層・下層においては、急激にひずみが発生し液状化に至っている。まさ土の $N/N_{f,5\%} - (u/p_c')_{max}$ および $N/N_{f,5\%} - \varepsilon_{DA}$ 関係を

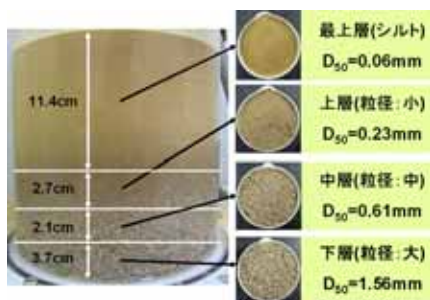


図-6 まさ土の沈降終了時の堆積状況

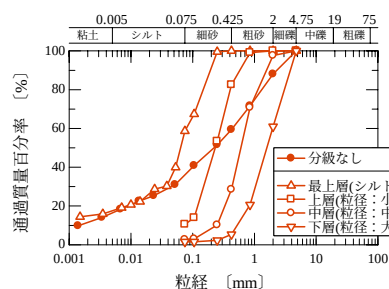


図-7 分級堆積したまさ土の粒径加積曲線

表-1 分級堆積したまさ土の物理特性

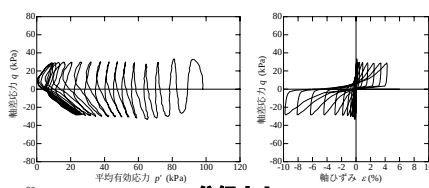
試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	細粒分含有率 F_c (%)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	平均粒径 D_{50}
(まさ土)					
分級なし	2.654	35.4	427	4.96	0.22
最上層(シルト)	2.657	57.5	0.06		
上層(粒径:小)	2.633	9.9	4	1.15	0.23
中層(粒径:中)	2.620	2.8	2.96	1.14	0.61
下層(粒径:大)	2.646	1.9	3.69	1.21	1.56

表-2 供試体密度

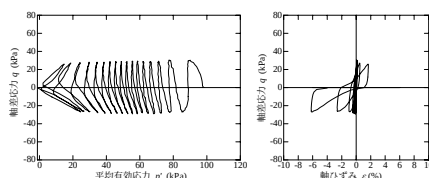
試料名	まさ土
分級なし	0.513
上層	0.939
中層	0.881
下層	0.861

図-9、図-10 にそれぞれ示す。まさ土は分級すると豊浦砂のような粒径の揃ったきれいな砂と同様な間隙水圧・軸ひずみの変化を示すことが分かる。液状化強度曲線を図-11 示す。図には、兵動ら³⁾が行った豊浦砂の試験結果も比較のため示している。まず、水中落下法で作成した分級されていないまさ土は相対密度 70%の豊浦砂を下回る程度に液状化しやすい材料であることが分かる。また、分級によって液状化挙動が豊浦砂の液状化挙動と同じ特徴を持つようになったことから、分級されたまさ土の液状化強度は分級されていないものに比べ低下することが予想されたが、実際には大きな違いは見られなかった。この結果は意外なものに思えるが、長野ら⁴⁾が粒度組成の異なる砂に対し行った実験でも同様な傾向が得られている。

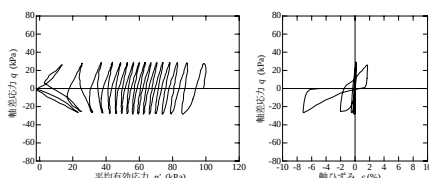
- 6. まとめ**
- 1) 豊浦砂のようなきれいな砂は間隙水圧が急激に上昇すると同時にひずみが急激に増大して液状化に至るが、粒度が良く細粒分を含むまさ土では、繰返し回数の増加に対し、間隙水圧と軸ひずみを緩やかに増大させながら液状化に至る。
 - 2) まさ土は分級するときれいな砂と同様な液状化挙動を示すようになる。
 - 3) 一方でまさ土の液状化強度は分級しても大きく変化しない。



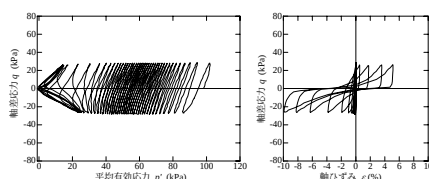
(a) 分級なし: $q_{cyc}/p_c' = 0.304$, $N=15$, $e=0.511$



(b) 上層: $q_{cyc}/p_c' = 0.291$, $N=17$, $e=0.919$



(c) 中層: $q_{cyc}/p_c' = 0.287$, $N=16$, $e=0.865$



(d) 下層: $q_{cyc}/p_c' = 0.286$, $N=40$, $e=0.873$

図-8 分級したまさ土の液状化挙動

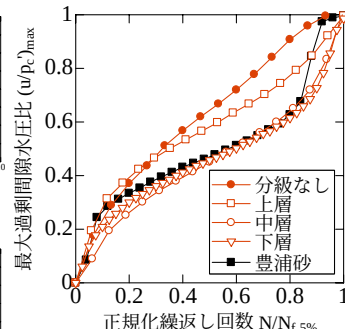


図-9 正規化繰返し回数～最大過剰間隙水圧比関係

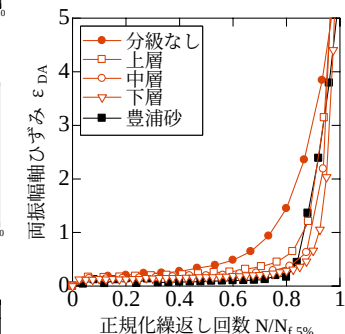


図-10 正規化繰返し回数～両振幅軸ひずみ関係

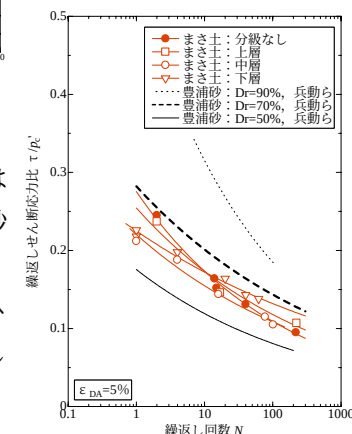


図-11 まさ土の液状化強度に及ぼす分級の影響

【参考文献】1) 沿岸開発技術センター：埋立地の液状化対策ハンドブック。2) 後藤ら：ポートアイランドにおける埋立て地盤の土質および堆積特性について，第 31 回地盤工学研究発表会，pp249-250，1995 年。3) 兵動ら：破砕性土の定常状態と液状化強度，土木学会論文集，No.554/III-37，pp197-209，1996 年 12 月。4) 長野ら：粒度組成の異なる砂の単調および非排水せん断挙動，平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会概要集，2009 年。