

闫蕊鑫, 彭建兵, 王烁. 饱和土静态液化研究进展综述及趋势浅析[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 137-145. [YAN Ruixin, PENG Jianbing and WANG Shuo. Research progress review and trend analysis of static liquefaction on saturated soils[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 137-145. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.024.]

饱和土静态液化研究进展综述及趋势浅析^{*}

闫蕊鑫^{1,2}, 彭建兵¹, 王烁¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 静态液化作为土体一种特殊的液化失稳现象, 近年得到国内外学者的广泛关注; 特别是随着静态液化诱发工程灾害事故报道增多, 对于静态液化现象的深入系统认知具有重要的现实意义。该文对饱和土体静态液化现象开展综述研究, 首先, 通过开展国内外典型性工程灾害事故介绍及灾害机理分析, 了解静态液化诱发工程灾害存在的典型特征; 而后, 系统综述静态液化室内试验方面研究, 把握国内外学者对土性特征、典型试验现象, 为后期类似试验开展提供技术参考。最后, 基于典型性工程灾害、室内试验效果归纳, 结合目前研究现状, 简要分析了饱和土静态液化领域未来研究的工作重点及难点, 以期为本领域研究人员提供前期参考。研究结果可为认知静态液化现象及发生特征提供基础性资料参考。

关键词: 饱和土; 静态液化; 工程灾害案例; 室内试验; 发展趋势

中图分类号: X43; TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)02-0137-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.024

液化是土体发生破坏的常见形式, 一般系在外力扰动作用下, 孔隙水压力上升, 有效应力逐渐减小至零, 导致的土颗粒丧失接触压力及粒间摩擦力, 无法抵抗剪应力作用影响, 产生土颗粒悬浮, 进而使得土体呈现由固态向液态转化的现象。其中引起液化的外力作用很多, 一般认为地震、爆炸、机械振动等动力因素是引起饱和土液化的主要因素, 将该类液化现象称为动力液化, 也是土体液化中最为常见现象; 而实际上, 土体中还存在着一种特殊液化形式, 其是在单调加载或纯静荷载作用下, 同样产生类似动力液化的孔隙水压力上升, 有效应力降低, 并最终导致土颗粒丧失抵抗剪切能力的等现象, 称之为静态液化。

对于静态液化现象的认知, 最早由 Terzaghi 等人^[1]在 1948 年发现, 其在对饱和粉细砂试验观察中得到, 饱和粉细砂会在很小扰动作用下出现类似粘滞性液体性状现象, 并将该现象进行了简单描述, 称之为“自然性液化 (Spontaneous Liquefaction)”; 而后, Castro^[2]开展针对砂土的一系列不排水三轴压缩试验, 重点关注峰值后偏应力变形的稳定状态, 并将该试验过程中出现的液化定义

为“静态液化”, 并提议应与循环活动性液化进行区别研究; Casagrande^[3]观察单调荷载不排水条件下砂土样在大应变时的孔隙比极值, 发现当初初始孔隙比松散至临界时, 将会出现明显的超孔隙压力, 并伴随液化现象发生, 其将该临界状态定义为稳定状态, 进一步明确静力荷载液化过程与动三轴中饱和试样的液化过程进行区分, 将静态液化作为液化一种特殊形式进行研究, 以上研究奠定了静态液化研究的整体雏形。随着对静态液化现象认识深入, 诸多学者逐渐认识到静态液化造成土体抵抗能力丧失的影响, 并围绕其诱发的工程灾害进行了详细分析, 同时, 学者开展了大量室内试验分析, 对于深入认识静态液化机理具有较好指导价值。

本文针对饱和土体静态液化这一特殊现象, 对国内外关于静态液化研究现状开展综述。首先, 整理国内外因静态液化产生的典型工程灾害报道, 结合后期相关学者研究分析, 对该工程灾害发生条件及土体液化过程开展分析, 进而归纳静态液化诱发灾害的主要特征; 而后, 对国内外学者开展的静态液化室内相关试验开展梳理及归纳, 分析室内试验

^{*} 收稿日期: 2017-09-22 修回日期: 2017-11-07

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目“黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论”(2014CB744702)

第一作者简介: 闫蕊鑫(1985-), 女, 山西运城人, 博士研究生, 工程师, 主要从事黄土液化机制与工程灾害研究。

E-mail: yanruixin1985@163.com

通讯作者: 彭建兵(1953-), 男, 湖北麻城人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事黄土工程地质与地质灾害研究。

E-mail: dicexy_1@chd.edu.cn

条件下土体产生静态液化的所对应的土性特征、典型试验现象；最后对静态液化现象的未来研究做了简要分析，以期更多学者对该问题开展深入关注。

1 静态液化诱发典型工程灾害综述

1.1 国外典型静态液化工程灾害

(1) 南非 Merriespruit 尾矿坝溃坝事故(1994 年)

该溃坝事故发生在 1994 年 2 月 22 日夜，在暴雨袭击 2 h 后，尾矿坝北侧发生溃坝，溃坝导致坝体出现宽约 160 m 的缺口，进而诱发较大规模的尾矿溃泻，高达 30 m 的尾矿渣裹挟雨水奔涌而出，最终多达 69 万 m^3 的砂石流沿坝体下游蔓延，最终滑动前缘达 2 km 之远，沿途将下游约 1 km 的矿区村庄夷为平地，最终导致 17 人死亡，80 多间房屋遭受破坏。图 1 为该尾矿坝溃坝事故照片。

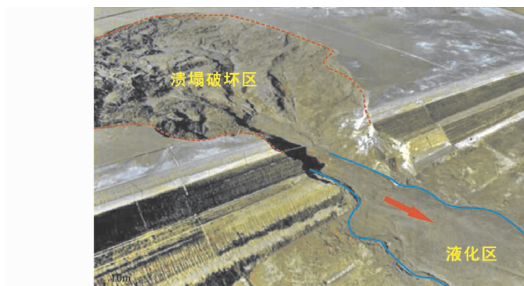


图 1 南非 Merriespruit 尾矿坝溃坝事故

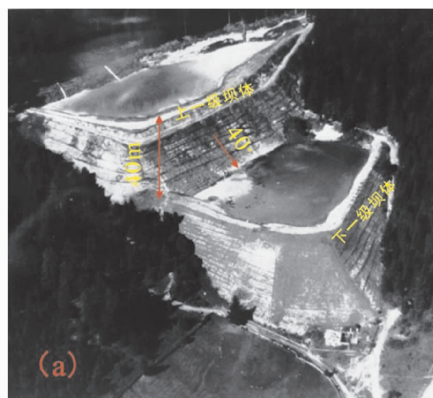
该溃坝事故发生后，许多学者开展事故原因分析。其中，Blight^[4]开展现场十字板剪切试验，发现饱和尾矿渣在排水或局部排水条件下，尾矿渣发生了明显的剪胀变形，最终内摩擦角降至仅有 6° ，近似失去了抗剪切能力，其解释为剪胀作用导致孔隙水压力升高，使得尾矿静态液化，最终发生了高速远程的溃坝事故。Fourie^[5]将 Merriespruit 尾矿坝溃坝明确认为是静态液化造成工程灾难，其对开展不同粒度分布下重塑尾矿渣的三轴不排水试验，并确定各自对应的稳态线；并对原状尾矿渣对比发现，现场尾矿渣处于亚稳态特征，其在受到降雨水分侵蚀作用下最终发生了静态液化现象。Brzezinski^[6]肯定了 Merriespruit 尾矿坝溃坝的静态液化灾害机理，并对如何从该事故中汲取预防措施提出新的问题；Niekerk^[7]详细描述了 Merriespruit 尾矿坝溃坝整个过程，并认为不合理的坝体坡度设计及过量降雨导致尾矿液化溃坝。

(2) 意大利 Stava 萤石矿溃坝事故(1985 年)

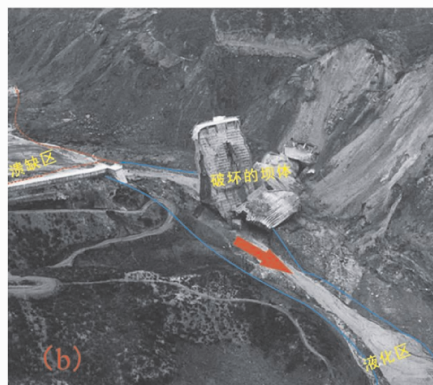
1985 年 1 月 19 日，意大利特兰托小镇 Stava 发生了严重的萤石矿溃坝事故，约 20 万 m^3 的尾矿以时速 90 km/h 涌向下游小镇，总延伸长度达到

4.2 km，形成厚约 20 ~ 40 cm 砂石流淤积层，波及影响范围达 43.5 万 m^2 ；本次事故造成 268 人丧生，并造成 62 处建筑物彻底损毁，直接经济损失达 1.55 亿欧元。本萤石矿坝包括上下两级，首先上一级坝体溃缺，奔涌而出泥石流引起下一级坝体溃缺，最终形成大规模工程事故。

事故发生后，经各方调查发现，其核心问题在于上一级坝体选位及设计问题，该级坝体被建设在终年沼泽砂土上，周边排水非常困难；而且该级坝体设计过高，达到 40 m，但同时坡度达 40° ，且坝内堆积多为过多松散尾矿渣。详细溃坝前后对照如图 2 所示。



(a) 溃坝前坝体整体状况



(b) 溃坝伴随明显液化现象

图 2 意大利 Stava 萤石矿溃坝事故

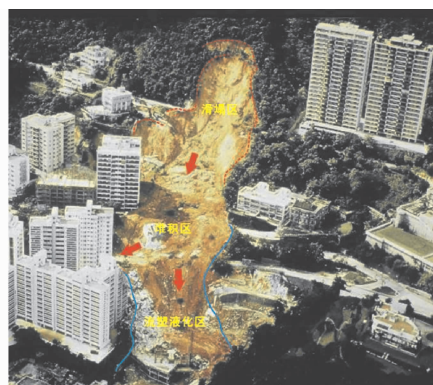


图 3 中国香港宝珊道“6.18”大滑坡事故

后期学者围绕溃坝事故展开深入的失稳机理分析, Sammarco^[8]开展对 Stava 溃坝事故的深入分析, 最终其认为, 溃坝发生极有可能原因为上一级坝体基底发生了液化现象, 并认为与矿渣高含水及松散结构有关, 此外坝体不良排水系统加剧了液化的发生; Rico^[9]对全球尾矿溃坝进行了统计发现, 多达 30% 以上溃坝与降水有关, 且多数发生与坝体内部排水不畅有关, 并围绕 Stava 溃坝事故进行了简要分析; Carrera^[10]将 Stava 溃坝事故归结于静态液化引起, 其认为正是上一级坝体基底的粉砂含量控制了基底土的本质特征, 其通过试验证明, 在高轴压条件下, 粉砂含量越高, 将导致砂土正常压缩线 (normal compression line) 及临界状态线斜率及截距变低, 进而诱发静态液化的发生。该试验结果较好证明了高堆载作用下 Stava 萤石矿坝由静态液化引起的溃坝事故。

1.2 国内典型静态液化工程灾害

(1) 香港宝珊道“6.18”大滑坡事故(1972 年)

1972 年 6 月 18 日下午 5 - 8 时, 在连续暴雨袭击香港岛后, 宝珊道后侧边坡发生连续发生大规模滑塌事故, 滑坡完全冲破 Kotewall Road (旭和道) 及 Po Shan Road (宝珊道) 挡墙, 最终 4 万 m³ 多的暴雨夹杂经水浸泡松散土的泥石流体奔涌而出, 涌入近 2 km 之外的 Robinson Road (罗便臣道), 最终造成多达 67 人死亡、20 人受伤的严重灾害, 滑坡下缘道路冲断、两栋高层建筑完全损毁, 连距离滑坡约 1.2 km 之远的 Kotewall Court 也被削去一角, 直接经济损失达到数千万港元。宝珊道“6·18”大滑坡事故现场照片如图 3 所示。

同时受本次暴雨影响, 香港秀茂坪也发生了大滑坡灾难, 造成 71 人死亡; 此后的 1976 年、1994 年, 香港秀茂坪、观龙楼分别又发生了大规模滑坡事故, 分别造成 18 人、5 人死亡^[6]。

连续的暴雨滑坡灾难引起香港及国内外学者的深入关注, 并试图深入揭示其滑坡发生机理。戴福初等^[11]通过对香港地区风化坡残积土进行室内试验和理论分析, 揭示了香港大屿山地区暴雨滑坡泥石流的形成机理: 土体出现应变软化, 部分土体出现静态液化而导致土体强度丧失; 同样, Chen^[12]经过对香港饱和土 (全风化花岗岩屑) 开展详细不排水固结试验发现, 随着固结压力增加, 饱和土的孔隙水压力快速增长, 偏应力在较低的应变 (1% ~ 2%) 条件下出现峰值, 且前期固结曲线 (NCL) 近似平行于极限稳态线 (CSL), 而后出现明显的应变软化特征。对其深入分析后认为, 不

能完全排除静态液化现象的发生; 而 Take^[13]对香港滑坡开展室内物理模型试验, 研究认为, 香港地区滑坡更应属于局部瞬态孔隙水压力增加诱发的流滑向泥流的转换现象, 在难以确保滑坡土体充分饱水前提下, 静态液化似乎难以解释清楚。

(2) 泾阳南塬系列黄土滑坡事故 (1984 年至今)

泾阳南塬位于陕西省泾阳县泾河南岸, 其整体呈现东西延长方向, 总延伸程度达 28 km, 主要贯穿太平、蒋刘及高庄 3 个行政乡, 受到泾河隐伏断裂影响, 在泾河南部隆起沉积第四系黄土, 最终形成了黄土台塬^[14]。受近年大规模灌溉影响, 泾阳南塬出现了 83 起黄土台塬滑坡事故, 其中 15 处发生多起滑动, 造成严重人员伤亡以及财产损失^[15]。该区域黄土滑坡整体分布状况如图 4 所示。

例如, 1984 年 12 月 2 日 00:40, 泾阳县泾河南塬蒋刘乡河滩村发生了大规模坡体滑动, 塬边黄土迅速脱离塬体, 并产生远程滑动, 水平滑程 380 m, 最终延伸至近 600 m 外的泾河河滩, 造成滑体下村庄全部夷平, 形成长约 500 m、厚约 12 m, 总覆盖面积达 1.3 万 m² 的堆积体。事故致使 20 人死亡、20 人重伤。

再如, 2003 年 7 月 23 日凌晨 4 时, 泾阳泾河南塬东风村发生塬体整体滑动, 水平滑距达 267.4 m, 堆积层厚度约 12 m。本次灾害毁损玉米约 5.3 hm², 银杏约 13.3 hm², 但未造成人员伤亡。滑坡造成直接损失 400 余万元。另该滑坡又与次年复发, 最终形成东西宽约 500 m, 堆积体积约 128 万 m³ 的巨型堆积体。此外, 寨头、庙店、舒唐王等也多次发生塬边黄土滑坡, 泾河南塬已成为黄土滑坡发生较为密集区域。

对该区域滑坡群自身发育特征调研分析发现, 整体呈现以下主要特征: ①滑坡整体后缘坡度较陡, 据许领等^[14]统计, 该区域滑坡后缘平均坡度可达 48.7°, 且越为早期滑动, 其对应后缘坡度越陡; ②滑坡体多从坡脚部位剪出, 后会沿阶地阶面发生长距离滑动, 一般可延伸 200 ~ 300 m, 呈现为典型的远程滑坡; ③最终滑坡体多呈舌形, 后缘洼地呈“弯月形”, 两端窄而浅, 中间宽而深; 中部为鼓丘、洼地相间排列组成波浪形地形, 且延伸方向与滑动方向垂直; 而多数滑坡前缘伴有泥浆挤出, 形似泥流堆积, 且前缘往往延伸距离较长。该区域典型滑坡整体发育形态图 5 所示 (以西庙店滑坡为例)。

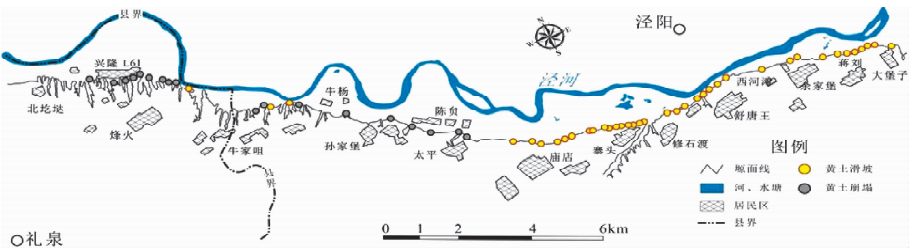


图 4 泾河南塬黄土滑坡群整体分布状况^[15]

表 1 国内外静态液化室内试验土性特征归纳一览

文献来源	土样类型	粒度组成	密实度	其他指标	静态液化结果
Kramer 等 ^[21]	Sacramento River 细砂 (SRFS), 粉砂(SS)	SRFS: 干净砂, 均粒细砂, 级配不良 ($C_u = 1.41$) SS: 均粒细砂, 含约 12% 细粒, 级配不良 ($C_u = 2.0$)	相对密实度 (32%, 37%, 44%, 47%)	—	低相对密实度 (32%, 37%) 时发生静态液化, 且在不同围压下、初始剪应力下均发生静态液化
Lade 等 ^[22]	Nevada 砂; Ottawa 砂	选取细粒含量 (0%, 10%, 20%, 30%, 50%) 对比分析	选取两种细粒含量时不同相对密实度 (26%, 39%, 20%, 44%, 48%); (44%, 54%, 20%, 58%)	—	Nevada 砂、Ottawa 砂低围压、较高细粒含量时均发生完全静态液化, 而低相对密实度时, 亦可发生完全静态液化。
Yamamuro 等 ^[23]	Nevada 砂	均粒砂, 其中 Nevada 砂 (颗粒形态: 50/200) 粉粒含量 6%; Nevada 砂 (颗粒形态: 50/80)	—	粉粒含量	不排水试验中松散粉砂在低围压下易于静态液化, 而粉粒含量会促进液化发生。
Della 等 ^[24]	Chlef 砂	$D_{50} = 0.45$ mm, 均匀系数 $C_u = 3.2$, 含 0.5% 无塑性粉粒, 塑性指数 $I_p = 5.81$	两种相对密实度 (29%, 80%)	—	松散砂、密砂均在低围压下发生静态液化, 而在围压增大后仅会发生暂时性液化。
Monkul 等 ^[25]	Nevada 砂、粉砂	其中, 粉粒含量取 5%、20%, 均匀系数 C_u : 粉土 > Nevada 砂	—	细粒含量	纯净砂在低围压时发生静态液化, 平均粒径比 ($D_{50-sand}/d_{50-silt}$) 小时, 不同粉粒含量的砂土在低围压均发生静态液化; 平均粒径比较大时, 高含量粉粒砂土低围压时发生暂时液化
Krim 等 ^[26]	Oued Rass 砂	$D_{50} = 0.25$ mm, 均匀系数 $C_u = 1.56$, 含 0.8% 无塑性粉土	两种相对密实度 (24%, 60%)	—	湿击法砂土在低围压、低密实度时发生静态液化, 而高围压或较高密实度时, 暂时液化
金艳丽 等 ^[17]	Q ₂ 黄土	粉粒 (66.5%)、粘粒 (20.3%)、砂粒 (13.2%)	—	—	发生静态液化
赵春宏 等 ^[27]	填土	—	最优含水率为 18.9%, 最大干密度 1.77mg/m ³	相对击实度 75%、85%	发生静态液化
朱建群 等 ^[28-29]	南京粉细砂	均粒土, 级配不良 ($C_u = 1.78$), 细粒含量 5.8%	选取三种密实度 (15%, 48%, 76%)	—	松散南京砂在低围压下发生静态液化现象



图5 泾河南塬典型典型滑坡整体发育形态——以西庙店滑坡为例

王家鼎^[16]对该区域黄土滑坡发生高速远程滑动进行分析, 认为其存在滑动液化机制, 并分析了黄土出现液化的原因及影响因素; 金艳丽^[17]对泾阳南塬东风滑坡饱和原状样进行 CDS 三轴应力路径试验, 结果表明, 土体应力-应变模式为强烈应变软化型, 属于典型静态液化现象; 许领^[14]基于黄土内摩擦角 (30° 左右) 与滑距坡度 (12° 左右) 对比分析认为, 该区域滑坡在下阶面滑动过程发生了静态液化; 廖红建^[18]同样以东风滑坡为例, 对滑坡体后缘和前缘的黄土进行了一系列的室内试验。认为: 浅层土具有强烈湿陷性, 灌溉或降水等易引发塬顶湿陷裂缝, 而前缘泾河阶地土易发生液化, 是发生远程流滑的重要诱发因素; 段钊^[19]对泾阳南塬黄土滑坡触发机理进行详细分析, 提出了灌溉触发黄土滑坡静态液化失稳机理; 彭建兵^[20]认为: 黄土静态液化集中反映为水-土互馈作用及致灾力学行为, 进而诱发黄土边坡重大灾害。

通过以上典型工程事故可看出, 静态液化已成为诸多饱和松散性土质边坡发生失稳破坏, 并产生远程高速运移的主要机制。可见, 深入开展静态液化机制研究, 对工程认知具有重要指导价值。

2 静态液化室内试验研究综述

2.1 静态液化试验土性特征分析

土性特征对于饱和土发生静态液化现象具有显著的影响, 如前工程案例综述知, 发生静态液化的土体多密实度不足, 多呈现为松散型; 此外, 其粒度组成特征多为级配不良, 且粉砂含量普遍偏高。为进一步归纳易发生静态液化的饱和土体特征, 现开展对国内外静态液化室内试验对象进行归纳。详细归纳如表 1。

根据表 1 国内外静态液化土性特征统计结果, 饱和土体当处于如下状况时, 更易发生液化: ①当其级配不良, 往往对应不均匀系数 $C_u < 5$, 导致

土体呈现某种阶段颗粒含量较多时; ②对砂性土而言, 当其含有相对较多的粉粒含量时, 会促使静态液化现象发生; ③其相对密实度越小、土样越松散, 其越容易发生液化; ④相对而言, 低围压环境更易造成饱和土体发生静态液化。⑤相同土体条件下, 饱和度越高越容易发生静态液化。

2.2 饱和土体静态液化试验效果分析

本节对国内外学者开展静态液化室内试验结果开展归纳, 通过对偏应力与轴向应变的关系 $q - \varepsilon_a$ 、孔隙水压力与轴向应变关系 $u_w - \varepsilon_a$ 以及应力路径 $q - p'$ 关系曲线等分析, 总结静态液化所呈现典型试验特征。其中, 国外学者饱和土静态液化试验效果见表 2 所示, 国内学者试验效果分析见表 3 所示。

从以上统计结果 (表 2、3) 可得到以下一系列有价值试验结论。

(1) 开展了不同围压条件下饱和砂土不排水固结三轴 (CU) 试验; 总体试验结果表明, 在低围压条件松散砂土较易发生完全静态液化, 而随着围压的增大, 试验效果转为暂时性液化, 乃至消失, 同时伴随着体缩向体胀特征的转换。

(2) 开展了不同细粒 (或粉粒) 含量的饱和砂土试验, 总体试验结果表明, 随着粉粒含量的增加, 液化现象整体趋于显著, 细粒 (或粉粒) 含量的增加有效提升了静态液化的可能性; 但细粒 (或粉粒) 含量增加至一定范围后对静态液化现象的影响趋于稳定。

(3) 开展了不同颗粒级配条件下的饱和土样试验, 总体试验结果表明, 级配状况严重影响静态液化现象的发生, 如前表 1 中土性特征分析, 土样不均匀系数越小、平均粒径比越小, 越容易发生液化现象。

(4) 开展了不同相对密实度的饱和土样试验, 总体试验结果表明, 饱和砂在相对密实度较低时, 即砂土处于松散状态时, 极易发生完全静态液化现象; 随着相对密实度逐渐增加, 砂土趋于中密, 乃至密实, 静态液化现象趋于减弱, 乃至消失。

(5) 土样的饱和程度及加载速率同样对静态液化现象存在一定影响。低饱和度砂土更不易发生液化; 而相较慢速加载过程, 不排水快速加载条件下, 松砂更易发生静态液化, 反映出静态液化发生的失稳模式应与试验加载速率存在关联。

(6) 因土性特征的差异, 饱和人工填土、碎石土、残坡积土、黄土等所呈现的静态液化特征应与砂性土存在一定程度差异, 可见, 针对特殊性土体的静态液化研究首先应关注其土性特征进而开展针对性试验。

表 2 国外学者开展饱和土静态液化试验效果分析一览

文献来源	试验方法	试验效果分析
Kramer, 等 ^[21]	ICU、ACU	(1)随着相对密实度增加,饱和 SRFS 砂、SS 砂抗静态液化强增大:相对而言,处于低相对密实度时更易发生液化,而相对密实度达到一定程度则仅发生“有限性液化”;当相对密实度高于稳定状态线时,土体表现为体胀特征; (2)饱和 SRFS 砂、SS 砂抗静态液化强度随着试验围压的增加而不断增加; (3)初始剪应力影响效果取决于启动液化所需的附加剪应力大小,随着初始剪应力增加,抗静态液化强度显著降低。
Lade, 等 ^[22]	CU, CD	(1)在低围压条件下,细粒含量增加极大增加了 Nevada 砂、Ottawa 砂液化可能性。试验过程中,所有较高细粒含量砂均发生了完全静态液化; (2)在低相对密度条件下, Nevada (50/200) 砂发生完全静态液化,而随着相对密度增加,液化可能性降低; (3)细粒(粒径 < 74 μm)含量是发生 Nevada 砂、Ottawa 砂静态液化主要原因; (4)体缩性可认为是表征饱和砂土发生静态液化现象的评价指标之一。
Yamamuro, 等 ^[23]	CU, CD	(1)CU 试验条件下,松散 Nevada 砂、Ottawa 砂在低围压下易于静态液化,而随着围压增大,逐渐转换为暂时性液化;此外,粉粒含量增加增加了液化可能性; (2)通过 CU、CD 对比试验,可解释 CU 试验中高围压条件下试样发生体胀原因; (3)基于松散砂土颗粒结构模型,详细解释了试验过程中低围压下砂土体缩,而高围压下先体缩后体胀现象的发生过程。
Della, 等 ^[24]	CU	(1)Chlef 砂抗静态液化能力随着围压的增加而增大,在低围压状况下,试样表现为完全体缩,而随着围压增大,体缩向体胀过程,围压继续增大,表现为完全体胀; (2)松散 Chlef 砂比密实的 Chlef 砂抗静态液化能力整体较弱; (3)通过对比干漏斗法、湿沉降法饱和 Chlef 砂开展静态液化试验发现,前者表现为体胀,而后者为体缩。
Monkul, 等 ^[25]	CU	(1)平均粒径比(D50 - 砂/d50 - 细)非常小时,细粒含量增加降低了抗静态液化能力; (2)在平均粒径较多前提下,随着细粒含量增大,抗液化能力出现先增大后减小趋势;而随着平均粒径比继续增大,该现象趋于显著; (3)粉粒形状同样对静态液化存在一定影响。
Krim, 等 ^[26]	CU	(1)随着围压的增加,Oued Rass 砂的抗液化能力整体增强; (2)随着相对密度的增大,Oued Rass 砂的抗液化能力整体增强; (3)类似前人研究,湿击法过程中土体表现为体缩,而干沉积法表现为体胀,整体认为湿击法更易发生液化;运用 X 射线断层摄影术证明湿击法更易液化原因。
Monkul, 等 ^[30]	CU	(1)干净 Nevada 砂颗粒分布越均匀(级配不良)、粒度越细,越易发生液化; (2)Nevada 砂不均匀系数越小(级配不良),越易液化; (3)在掺入低细粒含量(如 5%)时, Nevada 砂级配效应影响最为显著,而随着细粒含量(如 15%)增加时,效应趋弱,最后(如 25%)几乎消失; (4)基于级配与液化试验效果,提出了均一化峰值偏应力、均匀系数关系式。

3 饱和土静态液化研究未来发展浅析

以上研究对静态液化典型性工程案例、室内试验方案及试验结果开展了较为系统综述,对于饱和土静态液化现象的工程灾害发生特点、启动前提条件、影响因素、典型试验现象等给予了一定程度的归纳。但应该来说,目前关于饱和土静态液化的研究深度、广度依然不足。现站在笔者及团队认识角度,浅显谈几点关于饱和土静态液化研究应进一步努力发展的方向,供同领域学者批评指正。

(1)关于目前对饱和土静态液化现象及工程影

响的认识,国内尚存在一定程度的争议;争议原因一方面在于:饱和土是否确实发生了静态液化,尚未给出直观的、有力的证据;另一方面,工程灾害的发生如何准确界定其属于静态液化原因,难以明确判别。可见,对饱和土静态液化现象的深入认识,必须首先从室内试验出发,深入认知其发生的前提条件、形成机制、试验效果特征、影响因素等,如:静态液化的发生往往伴随孔隙水压力超增,但孔隙水压力何种条件下突增,其增加到何种程度液化?是否存在阈值等。

(2)关于饱和土静态液化的研究,目前国内外主要集中在针对饱和砂性土上,并归纳、总结形成一套较为成熟、可靠的试验方案。但是,砂性

表 3 国内学者开展饱和土静态液化试验效果分析一览

文献来源	试验方法	实验结果分析
戴福初, 等 ^[31-32]	ICU/ACU、CQD	(1) 香港火山岩坡残积土填土主要呈现剪胀、剪缩两种特征; 其中当为剪缩破坏时, 土体破坏后剩余孔隙水压力快速增加, 进而形成统一破坏面而滑动, 运动过程中孔隙水压力难以消散, 造成不排水流滑, 近似于静态液化现象。 (2) 重塑的香港火山岩坡残积土填土试样呈现应变软化特性, 但软化过程需一定的剪切应变, 属于渐进性破坏, 与砂土静态液化时结构突然丧失存在本质差异。
朱建群, 等 ^[28-29]	CU	(1) 松散南京砂在低围压 (50, 100 kPa) 下发生静态液化现象, 当偏应力达到峰值时, 其轴向应变 $\varepsilon < 1\%$, 呈典型应变软化特征; 而与南京砂具有相同土骨架的松散纯净砂却在低围压下未出现静态液化; (2) 随着固结压力的增大, 松散南京砂静态液化消失, 而中密和密实南京粉细砂表现出加工硬化的强度特征, 具有较高的抗静态液化能力; (3) 细粒的存在, 导致南京砂在低围压下具有更大的体缩性, 进而发生静态液化。
赵春宏, 等 ^[27]	ICU、CS	(1) ICU 试验结果表明, 填土试样达到峰值强度后呈明显应变软化特征, 并伴随有孔隙水压力增大, 试样达到峰值强度所需应变很小, 进而发生静态液化; (2) CS 试验结果表明, 填土试样有明显的应变软化特性并伴随孔隙水压力的上升, (3) 地下水位上升是造成该人工填土边坡出现静态液化, 进而诱发流滑主要原因。
金艳丽, 等 ^[17]	ICU/ACU、CQD	(1) ICU/ACU 试验表明, 试样在偏应力很小下达到峰值, 随后呈现强烈应变软化; 孔隙水压力持续上升到最大值后稳定, 对应近乎零有效应力状态, 进而发生液化; (2) CQD 试验表明, 试样破坏形式为不完全排水剪缩破坏, 进而发生静态液化。
黄茂松, 等 ^[33-34]	CU	(1) 对不排水条件下松砂快速、慢速加载对比发现, 快速加载更易发生静态液化; (2) 基于材料状态本构模型, 通过二阶功理论建立了静态液化失稳判别准则; (3) 土体失稳发生于塑性极限前的硬化阶段, 且土体失稳点与剪应力峰值点重合, 剪切应力减小及孔压上升是由于静态液化现象发生。

土研究成果是否适用于其他诸如人工松散填土、黄土、垃圾土及尾矿渣土等土, 需要进行深入的研究及系统对比分析。依据目前仅有的研究成果来看, 因各自土性特征的差异, 静态液化现象对应的试验条件、方案、效果应存在显著差异, 应区别对待。

(3) 目前国内外关于饱和土静态液化认识以室内试验曲线、工程灾害现场分析为主, 认知深度有待提高, 目前关于静态液化诱发的力学机理、转化特性等深部问题认知程度不足, 尚未提出可准确反映静态液化现象的饱和土本构模型方程, 并用于工程实践指导。此外, 对于各种因素造成对静态液化现象的影响内在机理仍存在进一步研究需要, 如泾阳滑体下垫面的剪动液化顺着阶地堆积层粉细砂层发生, 其有别于黄土的静态液化。该部分工作应结合饱和土体在发生液化前后微观结构特征变化进行深入把握。

(4) 关于饱和土静态液化室内试验研究, 目前以 GDS 三轴试验仪为主, 围绕饱和重塑砂性土进行相关试验。但是由于重塑土破坏了土体的原有内在结构, 其试验成果尚不能完全准确反映真实情况, 如何开展针对饱和原状土的室内试验研究, 对土样制备及试验方案设计提出新考验; 此外, 随着三轴试验设备的增多, 开展多种试验形式的

室内试验研究将会丰富研究成果, 如目前逐渐在广泛使用的环剪仪^[35]等。

(5) 关于静态液化诱发工程灾害的认知方面, 也多依据现场观察推断及室内试验验证思路, 尚未形成直观、系统的现场认知思路及判定依据。因此, 探究认知现场工程灾害对应的静态液化现象证据, 并形成较为明确的评价指标及详细流程, 以便于现场工程灾害的定性化认知, 也是未来该领域的努力方向之一。

4 结论

本文围绕饱和土体静态液化现象开展了典型性工程灾害、室内试验方面的综述研究, 对于饱和土体静态液化现象存在的典型特征进行了一定程度归纳, 并对静态液化未来研究发展做了简要分析, 结论如下:

(1) 对国外南非尾矿溃坝、意大利萤石矿溃坝、国内香港滑坡、泾河南缘滑坡群等典型工程案例归纳发现, 静态液化已成为现今诸多饱和松散土质边坡发生失稳破坏, 并导致远程高速运移的主要原因, 其发生的基本特征与松散的土性特征、地下水急剧上升密切相关, 但其影响机制及发生过程等关键问题认识深度依然不足。但应指

出,随着人类认知的深入,静态液化诱发工程灾害问题应得到更为广泛的关注。

(2)对国内外学者开展的静态液化室内试验开展系统综述,介绍了国内外学者开展静态液化试验过程,并系统归纳了土性特征、典型室内试验效果,得到一系列针对静态液化现象的有益研究结论。

(3)针对静态液化研究尚存在较大发展的现状,对饱和土静态液化未来发展方向进行了浅显分析,指出未来该领域进一步研究重点,以期为同行学者关注静态液化研究抛砖引玉。

(4)饱和土静态液化研究方兴未艾,关注静态液化过程中典型特征,并明确其核心评价指标及方法,进而提出针对性本构模型,应为未来之着力研究工作。

参考文献:

- [1] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil mechanics in engineering practice[J]. Engineering Geology, 1948, 48(1): 149-150.
- [2] Castro G. Liquefaction of sands[M]. Harvard University, 1969.
- [3] Casagrande. Liquefaction and cyclic deformation of sands; a critical review. Harvard Soil Mechanics Series. [M]. Cambridge: Harvard University Press, 1975.
- [4] Blight G E. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 1997, 125(1): 9-18.
- [5] Fourie A B, Blight G E, Papageorgiou G. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tai. [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(38): 707-719.
- [6] Brzezinski L S. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure; Discussion [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1439-1440.
- [7] Niekerk H J V, Viljoen M J. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings - dam failures[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(2): 201-212.
- [8] Sammarco O. A Tragic Disaster Caused by the Failure of Tailings Dams Leads to the Formation of the Stava 1985 Foundation[J]. Mine Water & the Environment, 2004, 23(2): 91-95.
- [9] Rico M, Benito G, Salgueiro A R, et al. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846.
- [10] Carrera A, Coop M, Lancellotta R. Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings[J]. Géotechnique, 2011, 61(11): 935-946.
- [11] 戴福初, 李焯芬. 火山岩坡残积土地区暴雨滑坡泥石流的形成机理[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 147-153.
- [12] Chen H, Lee C F. Geohazards of slope mass movement and its prevention in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 2004, 76(1-2): 3-25.
- [13] Take W A, Bolton M D, Wong P C P, et al. Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes[J]. Landslides, 2004, 1(3): 173-184.
- [14] 许领, 戴福初, 闵弘, 等. 泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征[J]. 地球科学, 2010, 35(1): 155-160.
- [15] 段钊, 李文可, 王启耀. 泾河下游台塬区黄土滑坡类型与时空分布规律[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(3): 369-375.
- [16] 王家鼎, 刘悦. 高速黄土滑坡蠕、滑动液化机理的进一步研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1999, 19(1): 79-82.
- [17] 金艳丽, 戴福初. 饱和黄土的静态液化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3293-3298.
- [18] 廖红建, 李涛, 彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1939-1944.
- [19] 段钊. 黄土滑坡触发机理研究——以泾河下游南岸黄土塬区滑坡为例[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [20] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691.
- [21] Kramer S L, Seed H B. Initiation of Soil Liquefaction Under Static Loading Conditions [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(4): 412-430.
- [22] Lade P V, Yamamuro J A. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 918-928.
- [23] Yamamuro J A, Lade P V. Experiments and modelling of silty sands susceptible to static liquefaction [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 4(6): 545-564.
- [24] Della N, Arab A, Belkhatir M, et al. Identification of the behavior of the Chlef sand to static liquefaction [J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009, 337(5): 282-290.
- [25] Monkul M M, Yamamuro J A. Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(6): 931-942.
- [26] Krim A, Zitouni Z E A, Arab A, et al. Identification of the behavior of sandy soil to static liquefaction and microtomography [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(7): 2211-2224.
- [27] 赵春宏, 戴福初. 深圳某填土滑坡破坏机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 1-8.
- [28] 朱建群. 含细粒砂土的强度特征与稳态性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [29] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 南京砂强度特征与静态液化现象分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1461-1465.
- [30] Monkul M M, Etmian E, Şenol A. Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 89(10): 185-197.
- [31] 戴福初, 李焯芬, 王思敬. 松散击实火山岩坡残积土的应力应变特性及其对滑坡的意义[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 257-262.
- [32] 戴福初, 陈守义, 李焯芬. 从土的应力应变特性探讨滑坡发生机理[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 130-133.
- [33] 黄茂松, 曲颢, 吕玺琳. 基于状态相关本构模型的松砂静态液化失稳数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1479-1487.
- [34] 吕玺琳, 赖海波, 黄茂松. 饱和土体静态液化失稳理论预测[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1329-1333.
- [35] Suits L D, Sheahan T C, Sassa K, et al. Performing Undrained Shear Tests on Saturated Sands in a New Intelligent Type of Ring Shear Apparatus [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(3): 295-299.

Research Progress Review and Trend Analysis of Static Liquefaction on Saturated Soils

YAN Ruixin^{1,2}, PENG Jianbing¹ and WANG Shuo¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: As a special kind of liquefaction of soil instability phenomena, static liquefaction had attracted wide attention both at home and abroad. Especially with engineering disasters induced by static liquefaction increased, it is significant to cognize static liquefaction systematically. This article had reviewed research about static liquefaction of saturated soils. First, through introducing typical engineering disasters both at home and abroad and analyzing the disaster mechanism, typical characteristics existed in engineering disaster induced by static liquefaction were understood; Then, laboratory tests on static liquefaction were summarized systematically, mainly containing soil properties and typical experimental phenomena, which can provide technical reference for later similar test. Final, in view of typical engineering disaster and laboratory test result, combining with the research status, emphasis and difficulty for the future research on the static liquefaction of saturated soils were briefly analysed, in order to provide the domain researchers with early reference. The research results can provide the reference of basic data for cognizing static liquefaction phenomena and characteristics.

Key words: saturated soil; static liquefaction; engineering disaster case; laboratory test; development tendency

(上接第 121 页)

Regional Analysis of Agro-meteorological Disasters Loss Tendency Variation From 1978 to 2016 in China

WANG Dandan, PAN Donghua and GUO Guizhen

(National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China, Beijing 100124, China)

Abstract: China has 7 geographical regions, in which agro-meteorological disasters loss are significantly different. Supported by agricultural and natural disasters statistical database of China, the long term trend of the influences of drought, flood, hailstorm, chilling damage on crops area during 1978-2016 are covered in this article at the national and regional level. Then, based on the disaster theory, economic losses are estimated in 7 regions. Finally, by choosing the optimal parameters, exceeding probability of regional disaster areas on crops are covered. The results indicate that: Agro-meteorological Disasters, especially drought, have a great impact on agricultural production. Different from the decreasing tendency of national disaster areas on crops, drought disaster area, chilling damaged and disaster area have increased by years. On sub-regional analysis, drought damaged and disaster area in the northeast and drought disaster area in the southwest of China also have increasing trends. Chilling damaged and disaster area have increased in most regions except the northeast of China. Drought is the major disaster factor of crop economic losses in each region.

Key words: geographical division; disaster loss; trend variation; estimate of economic losses; China