

邓志飞, 刘吉夫, 郭兰兰, 等. 粘土矿物组成对土体液化特性的影响研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 213–219.
[DENG Zhifei, LIU Jifu, GUO Lanlan, et al. Research process on the Influence of Clay Mineral Composition on Soil Liquefaction Characteristics [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 213–219. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.039.]

粘土矿物组成对土体液化特性的影响研究进展^{*}

邓志飞^{1,2}, 刘吉夫^{1,2}, 郭兰兰^{2,3}, 李娇旻^{1,2}, 贾怡如^{1,2}

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 土体液化是地球表面众多地质灾害和工程灾害发生的关键机制, 而土体中粘土矿物的含量和矿物学性质对土体液化特性影响明显。本文通过系统分析国内外粘土矿物类型及其组成变化和粘土矿物与孔隙溶液之间的相互作用这两个方面对土体液化特性影响的研究成果, 发现当前研究中存在着循环、静态液化研究程度不匹配, 孔隙水性质与粘土矿物之间的相互作用对土体液化特性的影响规律和机制的研究不足等问题, 并指出研究粘土矿物与土体液化之间的关系可能有助于提高地质灾害监测与预警水平。

关键词: 粘土矿物; 液化; 界限含水率; 塑性; 孔隙水化学性质; 地质灾害

中图分类号: X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2020)03–0213–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.03.039

液化是一种当饱和土体经受不排水的静态或循环荷载时, 伴随着过度应变和孔隙水压力积累的有效应力显著降低的现象^[1–3], 是众多地质灾害和工程灾害发生的关键机制。这些灾害不仅包含由振动等循环荷载导致的循环液化, 例如地震导致的土壤液化^[4–6], 也包括降水等静态荷载导致的滑坡、泥石流等静态液化现象^[7–9]。我国每年因液化引起的灾害而产生巨大损失, 且相对于循环液化, 静态液化引发的地质灾害和工程灾害更为常见。此外, 在全球极端天气特别是极端降水事件的增多以及强度增加的背景下, 此类灾害的发生频次和灾害强度也将相应增加^[10–12]。

以往人们一般认为液化常见于无粘性或低粘性砂土, 细颗粒对于土体液化的影响从 1970 年代逐渐被研究者们关注。汪闻韶^[13]根据 1975 年海城 7.3 级地震和 1976 年唐山 7.8 级地震后观察到的液化现象首次提出了中国饱和粉土(少粘性土)液化可能性的判断准则。然而在之后的研究中发现, 粘性土壤存在更多液化的案例^[14–16]。对这类土体液化的影响因素进行研究发现, 这类土体的液化特性与粘粒组的性质具有较强的相关性。土的抗液化性能随着粘粒含量的增加呈现先减弱后增强的趋势^[17]。然而, 抗液化性的最低点对应的粘粒含量因粘粒中矿物组成的不同而有较大差异。粘

土矿物是粘粒中性质非常活跃的部分, 首先粘土矿物本身因为比表面积大、颗粒表面具有带电性等性质, 其本身就有很多变化的可能; 其次这些性质还会因孔隙介质特别是孔隙水性质的影响而发生变化, 这使得粘土矿物在土壤液化特性的影响上有着更为复杂的表现(图 1)。

土体液化方面的研究对于粘土矿物矿物学特征的关注大约从 1990 年代开始。1999 年 Kocaeli 地震期间, 土耳其境内发生了大量液化并导致地面遭受严重破坏。Bray 和 Sancio 等人^[18–19]的研究表明, 与粘粒含量相比, 粘粒中不同粘土矿物的性质和活性对于液化的判别更为重要。从 21 世纪初至今, 对于土体液化的影响因素和机制的研究越来越关注粘土矿物的矿物学性质, 不同孔隙溶液中粘土矿物的变化也逐渐被研究者们所关注。然而, 对于该方向的系统回顾比较少, 不同研究时期和研究方向的工作之间, 其沿革和交互影响不甚清楚, 不利把握该领域未来研究方向。本文通过对相关研究的梳理, 以期了解粘土矿物类型及其组成变化和粘土矿物与不同性质孔隙水之间的物理化学反应这两个方面对土体液化特性影响的研究现状。进而分析该议题中尚未完全解决的问题以及尚未涉及的方向, 为此议题的进一步研究提供参考。

^{*} 收稿日期: 2020–02–18 修回日期: 2020–05–03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502505); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0907)

第一作者简介: 邓志飞(1993–), 女, 安徽芜湖人, 博士研究生, 研究方向为地震地质灾害。E-mail: dengzhifei@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 刘吉夫(1968–), 男, 江西安福人, 副教授, 主要研究方向为地震地质灾害。E-mail: liujifu@bnu.edu.cn

郭兰兰(1980–), 女, 山西榆次人, 高级实验师, 主要研究方向为全球环境变化。E-mail: guolanlan@bnu.edu.cn

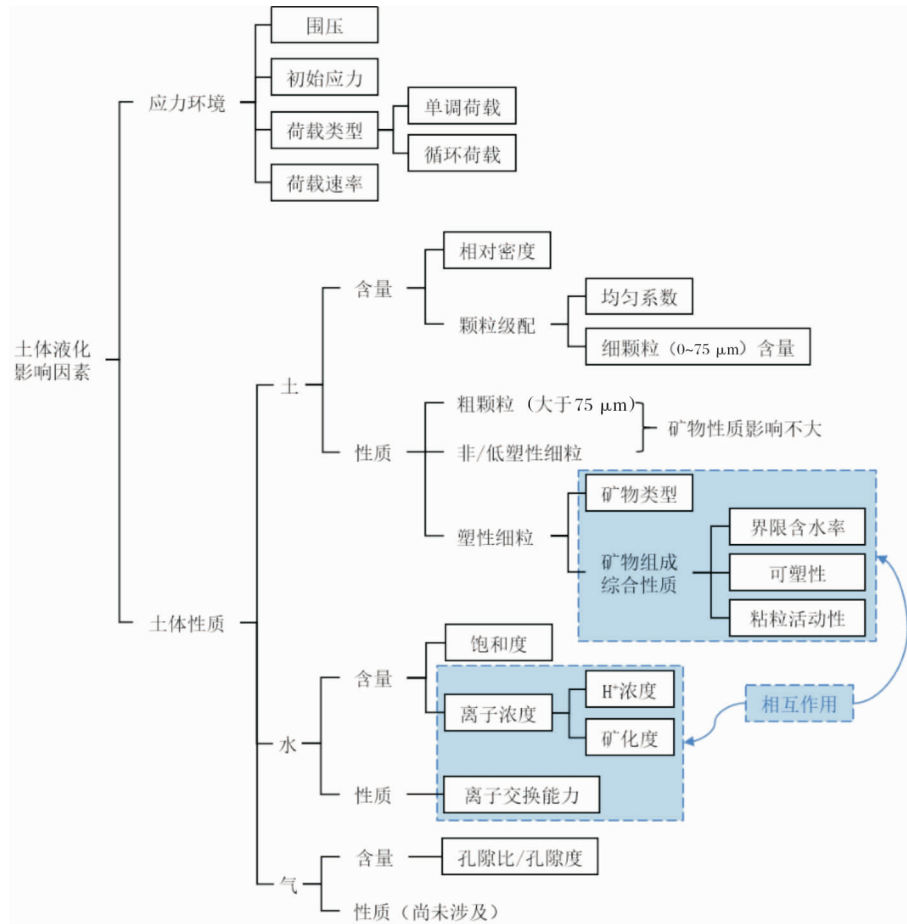
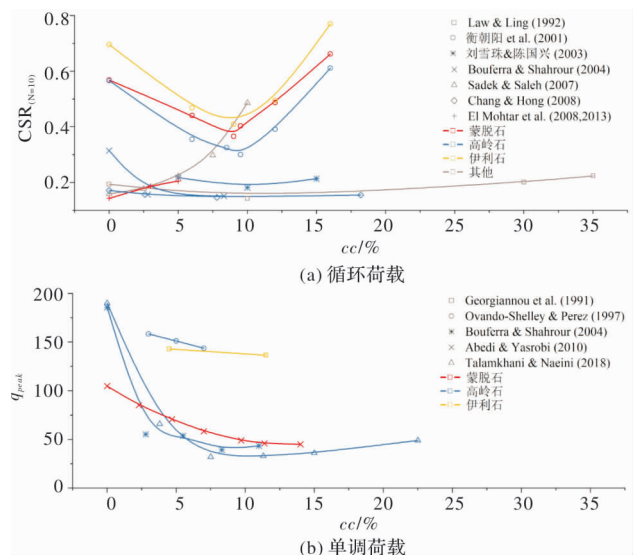


图1 土体液化的影响因素及粘土矿物在其中的作用

1 粘土矿物自身变化对土体液化特性的影响

1.1 粘土矿物的含量变化对土体液化特性的影响

含粘土矿物的粘粒含量对于土体液化性质的影响研究结果呈现出从多样到逐渐统一的过程。早先一些研究表明含粘粒砂土的抗液化性随着粘粒含量的增加而提高^[20-21]，而另一部分研究结论与之相反^[22-23]。这些研究中所使用的粘粒组成范围较窄，一般不超过10%，且使用的粘土矿物粒径不同。采用更大粘粒范围的研究表明，当粘粒加入非塑性粉砂中，混合物的抗液化性先降低，直至达到某一最低点或区间，随后随着粘粒含量的进一步增加，混合物的抗液化性随之增加^[24-38]。已有研究中，循环荷载下含粘粒砂土的最低抗液化性对应的粘粒含量范围在6.8%~20%，静态荷载下的研究比较少，大致在7%~10%之间（图2）。塑性粘粒的存在对于土体的抗液化性主要有两种作用：①塑性粘粒的存在会降低土体的水力传导性，土体在剪切过程中孔隙水压力增加的速率可能会增加，这对土体的抗液化强度起到削弱作用；②粘粒的可塑性给土体提供了一定的内聚力，这对于土体的抗液化性会起到增强作用^[39]。这两方面的相互作用决定含塑性细粒的土体的抗液化性是否比非塑性粉、砂更高。



(cc 为粘粒含量； $CSR_{(N=10)}$ 为循环次数 N 为 10 时的循环应力比； q_{peak} 为峰值偏应力)

图2 已有研究中粘粒含量与抗液化性之间的关系

粘粒含量对土体液化过程的影响因粘粒组中矿物类型的不同而存在差异。根据结构，粘土矿物可分为层状和非层状两大类，相比于非层状粘土矿物，层状粘土矿物在土壤中的分布更为广泛，其中最常见的矿物有蒙脱石、伊利石、高岭石三种。对于主要含蒙脱石的粘粒的循环液化特性研

究表明, 最低抗液化性对应的粘粒范围约在 6.8% ~ 10%^[27-28, 32-33], 而在静态荷载下的研究结果则在 4.7% ~ 7%^[37]。对于高岭石, 循环荷载下的研究结果显示这一转折点可能处于 7% ~ 18.2% 之间^[29, 35-36], 静态荷载下则可能在 30% 附近^[30]。由于伊利石常与其他矿物伴生, 提纯较为困难, 将伊利石对抗液化性的作用与其他矿物进行区分难度较大, 对于粘粒主要含伊利石的土的抗液化性研究较少。衡朝阳等^[27]的研究结果显示循环荷载下, 红土(伊利石 70% ~ 80%)和砂的混合物抗液化最低点对应的粘粒含量大约在 9%, Georgiannou 等^[24]的研究表明, 在单调荷载情况下粘粒含伊利石(60%)和高岭石(10% ~ 15%)的土壤抗液化最低点对应的粘粒含量大约在 10%。

一般认为, 1:1 型矿物(高岭石)与 2:1 型(蒙脱石、伊利石)相比, 更容易以较大的体积存在, 这使其比表面积相对较小, 将自由孔隙水转化为吸附水的能力较小。而矿物表面的吸附水与自由的孔隙水相比更具刚性, 这使土体表现出更强的抗液化能力^[16]。另外, 已有研究中最低抗液化性对应的粘粒比例范围差别大, 还可能和不同研究中试样孔隙度、粗颗粒级配等因素不同有关。

1.2 粘土矿物的组成变化对土体液化特性的影响

实际情景中土体的粘粒组分通常由多种粘土矿物组成, 不同矿物组成和含量的差异对土体液化过程影响明显。由于粘土矿物有较强的吸水性, 且不同类型的矿物吸水能力相差较大, 故一些反应土体吸水性能的指标被用来间接指示不同矿物组成带来的影响: 比如界限含水率(Atterberg limits, 包含液限 w_L 和塑限 w_p)^[40]、塑性指数(plasticity index, $PI = w_L - w_p$)^[41]、液性指数(liquidity index, $LI = (w_c - w_L)/PI$, 其中 w_c 为土体含水率)^[42]、粘粒活性(Activity, PI 与粘粒含量的比值)^[43]等。从这些指标的定义中可以看出, PI 可以反应的土壤性质相对较多, 事实上, 研究者们对于土体抗液化性和 PI 之间的关系也更为关注, 然而已有的研究结果并不具有一致性。

循环荷载下, 一些研究认为 PI 低于 10% 时, 土体抗液化强度变化不大, 当 PI 超过 10% 时, 抗液化强度随着 PI 的增加而增加^[44-47]。在低塑性范围内($PI \leq 4\%$), Ishihara^[44]认为 PI 的变化对于液化特性影响不大, 而后 Prakash & Sandoval^[48]校正了其研究中孔隙率的影响, 结果表明随着 PI 增加到 4%, 土体抗液化性将降低。Guo & Prakash^[39]的研究也证明了这一点, 即 PI 在 1.7% ~ 4% 内, 引起液化的循环应力比随着 PI 的增加而降低, 同时该研究发现, 当 PI 超过 4% 时, 引起液化的循环应力比随着 PI 的增加而增加, 认为存在 PI 的临界值, 且该值约在 4%。然而, 也有研究表明 PI 增加导致抗液化性降低的范围可以扩展到 11% ~ 13%, 当 PI 增加至约 11% 时, 抗液化性对于 PI 的变化开始不敏感^[34]。与此同时, 有 PI 较低时出现液化的研究^[49], 也有 PI 高达 17 的粉质粘土在地震中出现液化的案例^[4]。还有研究表明 PI 的增加导致抗液化性能增强这一现象仅在孔隙溶液离子浓度较低时存在, 当溶液离子浓度较高或者离子

类型发生改变时, PI 和抗液化性之间的关系则会出现偏差^[50]。与循环荷载条件下的研究相比, 静态荷载条件下对土体抗液化性与 PI 之间的关系研究相对较少, 但已有研究基本认为存在一个临界 PI , 在该临界值以下, PI 增加会降低其抗静态液化的能力, 超过临界值时, 抗静态液化的能力随 PI 增加而增加。关于静态荷载下的这一临界值, Boulanger & Idriss^[42]的研究倾向于在 7% 附近。

已有研究结果中 PI 和土体抗液化性之间的关系表明粘土矿物组成对土体抗液化性的影响很可能是非单调的, 且不同粘土矿物间结构及性质的巨大差异使其在对土体抗液化性的影响程度上存在差别, 在这一方面仍需要进一步的研究以揭示更多内在机制。另一方面, Beroya 等^[16]的研究显示, PI 不足以代表粘土的矿物学性质对循环强度的影响, 且在粘土矿物学的某些方面(如粘土矿物涂层 clay mineral coating 的差异, 水定向能力 water-orienting ability 等), PI 无法良好地表征。因此, 对于可以更有效且充分地表征粘土矿物对土壤行为的影响的参数或参数组合, 还需进一步探索。

2 粘土矿物与孔隙溶液的物理化学作用对土体液化特性的影响

粘土矿物颗粒细小, 比表面积大, 与周围介质特别是孔隙溶液的相互作用十分强烈。孔隙溶液与粘土矿物的相互作用最终会体现在对土的整体性质的影响上。在液化特性方面, Gratchev & Sassa^[51]研究了不同 pH (3 ~ 11) 环境下对高岭石(15%)、伊利石(15%)、膨润土(11%)和石英砂的混合物的循环液化特性, 结果表明 pH 对细颗粒土壤液化敏感性的影响在很大程度上取决于粘土组分的矿物组成, 特别是在酸性介质中, 伊利石和膨润土-砂混合物的液化阻力降低, 而高岭石-砂混合物的液化阻力略有增加, 其中的内在机制还需通过进一步的研究进行验证。与此同时, pH 和粘土矿物之间相互作用对于静态液化特性的影响, 以及溶液的化学组成与粘土矿物相互作用对土体液化特性的影响目前我们仍知之甚少。但通过已有研究, 我们可以推断孔隙溶液和粘土矿物的相互作用对土体液化特性的影响过程: 孔隙溶液与粘土矿物的相互作用使得粘土矿物的性质发生改变, 进而影响土壤的整体结构和性质, 使得土体的抗液化能力发生变化(图 3)。



图 3 孔隙溶液与粘土矿物相互作用下的土体液化过程

在孔隙溶液与粘土矿物相互作用对土壤性质的影响研究中, 界限含水率被认为是较为良好的表征指标^[51-52]。孔隙溶液与粘土矿物的作用对土体界限含水率的影响主要来自于粘土矿物的两方

面变化: ①由于溶液中阳离子浓度变化或粘土矿物表面阳离子被置换导致的粘土矿物双电层厚度变化。当粘土矿物的双电层厚度减小时, 粒间引力增大, 从而促进颗粒之间的集聚, 降低土体的液限, 反之则增加。已发现溶液中 H^+ 浓度升高会导致蒙脱石和伊利石的液限降低^[51,53-56], Ca 吸附伊利石的液限略高于 Mg 吸附伊利石的液限^[57], Na 吸附蒙脱石的液限远高于 Ca 吸附蒙脱石^[58]。②由于孔隙溶液酸碱性变化使得粘土矿物边缘电荷的性质改变, 进而影响到的矿物颗粒间联结方式。粘土颗粒断裂面上的电荷取决于 pH 环境, 在低 pH 下, 由于 H^+ 的吸附, 断裂面上正电荷多于负电荷, 而在高 pH 下, 由于 OH^- 的吸附, 断裂面上的负电荷多于正电荷。这就导致随着 pH 降低, 粘土矿物边-面($E-F$)结合趋于普遍, 这种联结方式使得颗粒之间存在较大的孔隙, 从而储存更多液体, 使土体具有较高的液限^[59,64], 而在高 pH 条件下, 面面($F-F$)结合占主导地位, 导致矿物集聚, 土体液限较低^[63,65]。 pH 对粘土矿物的这两种机理在 pH 范围约为 $3 \sim 11$ 时占主导地位, 且在高岭土中尤为典型^[54,66], 有研究表明在非常低和非常高的 pH 下, 矿物自身的结构可能会发生显著变化^[67]。

界限含水率由土壤结构决定, 其变化可以表征孔隙溶液对于土壤性质的影响程度, 且已有的研究表明由界限含水率决定的塑性指数与土体液化特性之间存在密切联系。目前仍需探讨的, 一是孔隙溶液性质变化引起的土体界限含水率变化与土体静态、循环液化性质之间的规律和已知的界限含水率与液化性质之间的规律是否具有-致性; 二是在多种复杂粘土矿物混合作为粘粒组分的情况下, 孔隙溶液性质变化引起的界限含水率变化是否仍能作为较好的表征以反应土体的液化特性; 三是如何将-些结果应用于与之相关的实际场景下的液化可能性评估当中。

3 前人研究的不足与展望

土体液化作为多种地质灾害和工程灾害发生的关键机制, 其性质受外在应力环境和土体自身属性两大类多方面因素的影响, 这使得认识土体液化机制, 了解各种内外因素对其的影响变得十分复杂。粘土矿物作为天然土壤中广泛存在的组成部分, 其特殊的结构和性质使其自身以及其与外部介质的相互作用在对土体液化特性的影响上表现多样。通过对已有相关研究进行梳理, 目前关于粘土矿物组成对土体抗液化性的研究已取得了一定的成果: ①基本明确了粘土矿物含量对土体抗液化性的影响存在转折点或过渡区间; ②土体界限含水率及由其决定的可塑性指数与土体液

化特性之间关系密切; ③开始关注粘土矿物与孔隙介质之间相互作用对土体液化性质的影响。但该领域总体上仍存在一些不平衡和研究薄弱的地方。

3.1 循环、静态液化的研究程度不匹配

相对于循环荷载引起的液化现象, 静态液化引起的灾害更容易发生, 也更为常见。目前液化影响因素的研究都关注到了粘土矿物矿物学性质的重要作用, 但对于不同的荷载条件, 研究程度不同。

总体而言, 循环荷载下土体的抗液化性研究与静态荷载下的研究相比更为充分, 主要体现在研究涉及的粘土矿物种类, 以及粘粒含量和指示粘土矿物综合性质的指标的影响研究上。循环液化方面, 粘土矿物对循环液化特性的影响研究对于三种典型粘土矿物都已有涉及, 矿物间对比研究较为充分; 而静态液化方面, 对典型粘土矿物的研究主要集中在蒙脱石和高岭石这两种, 且相对较少。另外, 目前对于粘土矿物的研究主要考虑层状粘土矿物, 对于粘粒组中存在的非层状粘土矿物、原生碎屑矿物和游离氧化物等的影响了解尚浅, 这些组分的存在是否会对已有认识进行修正有待进一步研究探讨。虽然无论是粘土矿物的含量还是指示粘土矿物综合性质的指标(界限含水率、 PI 、 LI 、粘粒活性等), 目前的研究结果都表明还需要进一步探索, 但对于静态荷载的情况, 需要我们给予更多的关注。

3.2 孔隙水性质对土体液化特性研究处于初级阶段

随着人类活动和景观开发的进一步进行, 酸雨、工业废物、有毒物质、重金属和有害污染物等已进入水资源, 受污染的水在与土壤的接触过程中, 即使在很短的时间内, 土壤孔隙溶液性质的改变也会影响土壤的性质^[68-72]。在此背景下, 土体液化特性的影响因素研究中对孔隙溶液性质加以考虑十分必要, 粘土矿物作为土体各组分中最活跃的部分, 其在孔隙溶液性质影响下的变化对于土体抗液化性的影响尤其值得关注。

已经进行了一些研究以了解孔隙溶液性质对粘土矿物的矿物学性质的影响, 以及相应的土壤性质的变化, 如界限含水率^[73,74]、可压缩性^[75-77]、水力传导率^[53,55-56]等。而在孔隙溶液性质对土体强度的影响方面, 则主要集中在对抗剪强度的影响上, 如粘聚力、内摩擦角、残余强度等^[78-84], 在土体的抗液化强度方面涉及较少, 规律不明。另外, 在目前的技术条件下, 界限含水率被认为是水-土作用的良好表征, 但其在复杂场景(粘土矿物组成多样, 孔隙溶液化学成分多样)下是否仍能作为良好的指标有待探讨。同时, 颗粒的比表面积, 阳离子交换性等关键性质的准确测量存在难度, 这也给认识孔隙水性质对土壤

行为的影响机制带来一定障碍。

3.3 从微观到宏观的推演研究亟待开展

对于灾害机制研究的最终目的是为了对灾害进行预防和治理,这就意味着与粘土矿物相关的微观研究结果需要被应用到当下以及未来的宏观的灾害危险性评估当中。

由于室内试验所用的试样常常是被扰动的状态,不能较好地反应真实情况,故区域液化潜力的评估更倾向于现场的原位试验。目前采用的标准渗透率测试(SPT)、锥形渗透率测试(CPT)、贝克曼渗透率测试(BPT)和现场剪切波速(V_s)等测试方法得到的测量结果,其可靠性基本可以满足预测土壤在循环荷载下的液化潜力的需求^[85-88]。然而静态荷载下液化潜力的现场判定方法还有待探索,且液化潜力评估结果可靠性的判断和提高,仍需要以室内的微观层面的研究结果和宏观的灾害规律之间建立的连接为基础。

此外,在较长的时间尺度上,粘土矿物的类型会因外在环境的作用而发生转化,且这一变化可能不仅是单纯自然环境演化的结果,人类活动对环境产生的影响可能会加速这一过程,或使这一过程更多样化。粘土矿物的这一类长时间尺度上的变化是否会对与之相关的灾害的空间分布产生影响值得探讨,而这类大尺度的灾害危险性空间分布的评估也需以粘土矿物微观研究的宏观推演作为基础。

参考文献:

- [1] Castro G. Liquefaction of sand^[D]. Harvard University, 1969.
- [2] Kramer S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. Pearson Education India, 1996.
- [3] National Research Council (US). Liquefaction of soils during earthquakes [M]. National Academy Press, Washington, DC, 1985.
- [4] Boulanger R W, Meyers M W, Mejia L H, et al. Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta earthquake[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(1): 146-158.
- [5] Seed R B, Cetin K O, Moss R E S, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework [C]//Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar; Long Beach, CA. 2003.
- [6] HUANG Y, YU M. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century[J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 2375-2384.
- [7] 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.
- [8] Van Niekerk H J, Viljoen M J. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings - dam failures[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(2): 201-212.
- [9] Carrera A, Coop M R, Lancellotta R. Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings[J]. Géotechnique, 2011, 61(11): 935-946.
- [10] Beniston M. Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(7): L07707.
- [11] Beniston M, Stoffel M, Hill M. Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: can current water governance cope with future challenges? Examples from the European "AC-QWA" project[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(7): 734-743.
- [12] Stoffel M, Tiranti D, Huggel C. Climate change impacts on mass movements-case studies from the European Alps[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 1255-1266.
- [13] 汪闻韶. 土液化特性中的几点发现[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 55-63.
- [14] Seed R B, Cetin K O, Moss R E S, et al. Recent advances in soil liquefaction: A unified and consistent framework[M]//Report No. EERC 2003-06. Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, 2003.
- [15] Bray J D, Sancio R B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9): 1165-1177.
- [16] Beroya M A A, Aydin A, Katzenbach R. Insight into the effects of clay mineralogy on the cyclic behavior of silt-clay mixtures[J]. Engineering Geology, 2009, 106(3-4): 154-162.
- [17] HUANG Y, ZHAO L. The effects of small particles on soil seismic liquefaction resistance: current findings and future challenges[J]. Natural Hazards, 2018, 92(1): 567-579.
- [18] Bray J D, Sancio R B, Durgunoglu H T, et al. Ground failure in Adapazari, Turkey [C]//Proc., Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conf. XVth Int. Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. 2001.
- [19] Sancio R B, Bray J D, Stewart J P, et al. Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazari, Turkey[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9/12): 1093-1102.
- [20] El Mohtar C S, Clarke J, Bobet A, et al. Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid [M]//Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. 2008: 1-10.
- [21] El Mohtar C S, Bobet A, Santagata M C, et al. Liquefaction mitigation using bentonite suspensions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(8): 1369-1380.
- [22] 吴建平, 吴世明. 重塑含粘粒砂土的动模量和液化势[J]. 浙江大学学报(工学版), 1988(6): 18-24.
- [23] Ovando-Shelley E, Perez B E. Undrained behaviour of clayey sands in load controlled triaxial tests[J]. Geotechnique, 1997, 47(1): 97-111.
- [24] Georgiannou V N, Burland J B, Hight D W. The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 431-449.
- [25] LAW K T, LING Y H. Liquefaction of granular soils with non-cohesive and cohesive fines [C]//Proceedings of the tenth world conference on earthquake engineering, Rotterdam. 1992: 1491-1496.
- [26] Koester J P. Effects of fines type and content on liquefaction potential of low-to medium plasticity fine-grained soils [C]//Proceedings of National Earthquake Conference. Central United States Earthquake Consortium (CUSEC), Memphis, Tennessee, 1993(1): 67-75.
- [27] 衡朝阳, 何满潮, 裴以惠. 含粘粒砂土抗液化性能的试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 339-344.
- [28] 衡朝阳, 裴以惠. 颗粒级配对含蒙脱石砂土抗液化性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2002(2): 31-34.
- [29] 刘雪珠, 陈国兴. 粘粒含量对南京粉细砂液化影响的试验研

- 究[J]. 地震工程与工程振动, 2003(3): 150–155.
- [30] Ghahremani M, Ghalandazadeh A, Moradi M. Effect of plastic fines on the undrained behavior of sands[M]//Soil and Rock Behavior and Modeling, 2006; 48–54.
- [31] Ghahremani M, Ghalandazadeh A. Effect of plastic fines on cyclic resistance of sands[M]//Soil and Rock Behavior and Modeling, 2006; 406–412.
- [32] Gratchev I B, Sassa K, Osipov V I, et al. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading[J]. Engineering Geology, 2006, 86(1): 70–84.
- [33] Gratchev I B, Sassa K, Osipov V I, et al. Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(3): 349.
- [34] Sadek S, Saleh M. The effect of carbonaceous fines on the cyclic resistance of poorly graded sands[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(2): 257.
- [35] CHANG W J, HONG M L. Effects of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(1): 101–114.
- [36] Derakhshandi M, Rathje E M, Hazirbaba K, et al. The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28(5): 376–386.
- [37] Abedi M, Yasrobi S S. Effects of plastic fines on the instability of sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(3): 61–67.
- [38] Talamkhani S, Naeini S A. Effect of Plastic Fines on Undrained Behavior of Clayey Sands[C]//20th International Conference on Geomechanics and Geoenvironmental Engineering. 2018.
- [39] GUO T, Prakash S. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8): 706–710
- [40] Andrews D C A, Martin G R. Criteria for liquefaction of silty soils [C]//Proc. , 12th World Conf. on Earthquake Engineering. Upper Hutt, New Zealand; NZ Soc. for EQ Engrg. , 2000.
- [41] El Hosri M S, Biarez J, Hicher P Y. Liquefaction characteristics of silty clay[C]//Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng. Prentice Hall, NJ. 1984; 277–284.
- [42] Boulanger R W, Idriss I M. Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1413–1426.
- [43] Skempton A W. The colloidal activity of clays[J]. Selected Papers on Soil Mechanics, 1953; 106–118.
- [44] Ishihara K. Cyclic shear strength of fines-containing sands[C]//12th ICSMFE, Special Volume of Influence of Local Soils on Seismic Response, 1989; 101–105.
- [45] Ishihara K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. Geotechnique, 1993, 43(3): 351–451.
- [46] Puri V K. Liquefaction aspects of loessial soils [C]//Proceeding 4th US National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerito, California. 1990, 3; 755–762.
- [47] Hyodo M, Hyde A F L, Yamamoto Y, et al. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays[J]. Soils and Foundations, 1999, 39(2): 45–58.
- [48] Prakash S, Sandoval J A. Liquefaction of low plasticity silts[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, 11(7): 373–379.
- [49] Tokimatsu K, Yoshimi Y. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 56–74.
- [50] Gratchev I B, Sassa K, Fukuoka H. How reliable is the plasticity index for estimating the liquefaction potential of clayey sands? [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006b, 132(1): 124–127.
- [51] Gratchev I B, Sassa K. Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(2): 271–279.
- [52] Bowders Jr J J, Daniel D E. Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(12): 1432–1448.
- [53] D'Appolonia D J. Soil-bentonite slurry trench cutoffs[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1980, 106(ASCE 15372).
- [54] LI L, LI R. The role of clay minerals and the effect of H⁺ ions on removal of heavy metal (Pb²⁺) from contaminated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 296–307.
- [55] Kashir M, Yanful E K. Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(5): 1034–1048.
- [56] Ruhl J L, Daniel D E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 369–381.
- [57] Olson R E, Mitronovas F. Shear strength and consolidation characteristics of calcium and magnesium illite [M]//Clays and Clay Minerals. Pergamon, 1962; 185–209.
- [58] Mesri G, Olson R E. Shear strength of montmorillonite [J]. Geotechnique, 1970, 20(3): 261–270.
- [59] Sridharan A, Rao S M, Murthy N S. Liquid limit of kaolinitic soils [J]. Geotechnique, 1988, 38(2): 191–198.
- [60] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [61] Sridharan A, Prakash K. Mechanisms controlling the undrained shear strength behaviour of clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1030–1038.
- [62] Warkentin B P. Shear Strength of Montmorillonite and Kaolinite Related to Interparticle Forces [J]. Clays and Clay Minerals, 1960, 9: 210–218.
- [63] Palomino A M, Santamarina J C. Fabric map for kaolinite: effects of pH and ionic concentration on behavior[J]. Clays and Clay minerals, 2005, 53(3): 211–223.
- [64] 戴肖南, 王其鹏, 赵超. pH 对 Mg-Al 类水滑石/kaolinite 分散体系流变性的影响[J]. 山东大学学报(理学版), 2011, 46(7): 26–29.
- [65] Van Olphen, H. Introduction to clay colloid chemistry[M]. Wiley, New York. 1977.
- [66] Jozefaciuk G. Effect of acid and alkali treatments on surface-charge properties of selected minerals[J]. Clays and Clay Minerals, 2002, 50(5): 647–656.
- [67] Sivapullaiah P V, Manju M. Effect of zeolitization on the volume-change behaviour of kaolinitic soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(9): 969–978.
- [68] Kamon M, YING C, Katsumi T. Effect of acid rain on physico-chemical and engineering properties of soils[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(4): 23–32.
- [69] Oztoprak S, Pisirici B. Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate [J]. Engineering Geology, 2011, 121(3–4): 110–122.
- [70] SHEN P, TANG H, HUANG L, et al. Experimental study of slaking properties of red-bed mudstones from the Three Gorges Reservoir area [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(8): 891–901.
- [71] WANG X, HUANG L, YAN C, et al. HKCV rheological constitu-

- tive model of mudstone under dry and saturated conditions[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: Article ID 2621658, 10 pages.
- [72] YAN C, XU X, HUANG L. Identifying the impact factors of the dynamic strength of mudstone intercalations during cyclic loading[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: Article ID 5805294, 9 pages.
- [73] Bakhshipour Z, Asadi A, Huat B B K, et al. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils[J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(6): 1008–1020.
- [74] LIU J, GAO Y. Effects of acid and base contamination on geotechnical properties of Shanghai remolded silty clay[C]//*GeoShanghai International Conference*. Springer, Singapore, 2018: 611–619.
- [75] Gratchev I, Towhata I. Compressibility of soils containing kaolinite in acidic environments[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(2): 623–630.
- [76] Bakhshipour Z, Asadi A, Sridharan A, et al. Acid rain intrusion effects on the compressibility behaviour of residual soils[J]. *Environmental Geotechnics*, 2017, 6(7): 460–470.
- [77] Chavali R V P, Hari P R P. Volume change behavior of phosphogypsum treated clayey soils contaminated with inorganic acids-a micro level study[J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2018, 26(1): 8–18.
- [78] Kenney T C. Residual strength of mineral mixtures[C]//*Proceeding of 9th International Conference on Soil Mechanics*. 1977, 1: 155–160.
- [79] Moore R. The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays[J]. *Geotechnique*, 1991, 41(1): 35–47.
- [80] Anson R W W, Hawkins A B. The effect of calcium ions in pore water on the residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite[J]. *Geotechnique*, 1998, 48(6): 787–800.
- [81] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, et al. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 21–25.
- [82] 梁健伟, 房营光, 陈松. 含盐量对极细颗粒黏土强度影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S2): 3821–3829.
- [83] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(7): 1146–1152.
- [84] Spagnoli G, Fernandez-Steeger T, Feinendegen M, et al. The influence of the dielectric constant and electrolyte concentration of the pore fluids on the undrained shear strength of smectite[J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50(5): 757–763.
- [85] Idriss I M, Boulanger R W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(2/4): 115–130.
- [86] Mhaske S Y, Choudhury D. GIS-based soil liquefaction susceptibility map of Mumbai city for earthquake events[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 70(3): 216–225.
- [87] Muduli P K, Das S K. Model uncertainty of SPT-based method for evaluation of seismic soil liquefaction potential using multi-genetic programming[J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(2): 258–275.
- [88] Cabalar A F, Canbolat A, Akbulut N, et al. Soil liquefaction potential in Kahramanmaraş, Turkey[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 1822–1838.

Research Process on the Influence of Clay Mineral Composition on Soil Liquefaction Characteristics

DENG Zhifei^{1,2}, LIU Jifu^{1,2}, GUO Lanlan^{2,3}, LI Jiaoyang^{1,2} and JIA Yiru^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 3. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: Soil liquefaction is the crucial mechanism of numerous geological and engineering disasters on the surface of the earth, and the content and mineralogical properties of clay minerals in the soil have significant effects on the soil liquefaction characteristics. We summarize the framework of the relationship between clay minerals and soil liquefaction phenomenon through a review of domestic and foreign research in two aspects: the effects of the changes in the type and composition of clay minerals on liquefaction resistance; and the effects of the changes of clay minerals under the influence of complex pore fluid chemical properties on liquefaction resistance. The shortages of the current research are considered as followed: the mismatch in the research degree of soil potential liquefaction under cyclic and static load, and the insufficient research in the laws and mechanisms of soil liquefaction effected by the interaction between pore fluid and clay minerals. It is pointed out that the study of the relationship between clay minerals and soil liquefaction may help to improve geological hazards monitoring and early warning level.

Key words: clay mineral; liquefaction; atterberg limits; plasticity; pore fluid chemical properties; geological disasters