

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.002

# 分散性土及工程应用的研究进展

樊恒辉, 张路, 杨秀娟, 巨娟丽, 陈涛, 康顺祥

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 分散性土在世界各地特别是干旱半干旱地区分布广泛, 属于一种水敏性的特殊土, 抗水蚀能力很低, 容易形成管涌、洞穴、冲沟等破坏, 对建筑物的安全性造成严重威胁。对分散性土的定义与内涵、分散机理、鉴定方法、改性应用进行了分析、总结与展望。分散性土是一种在水力坡降很低条件下由于土颗粒间的排斥力超过吸引力而导致土体产生分散流失的黏性土。分散性土的形成机理在于土体中的胶结物质特别是黏粒含量低或土体中含有较多的钠离子和酸碱度呈碱性。一般采用双比重计、碎块、针孔、孔隙水可溶性阳离子和交换钠离子百分比等室内试验结果来综合鉴定土样的分散性, 野外调查和经验模型等方法可作为辅助鉴定手段。采用物理保护、化学改性或综合处治提高分散性土的水稳性, 其中化学改性是最根本的方法。在未来的研究中, 应重视与加强研究土粒间斥力与引力关系、探索分散性土渗透破坏特别是土体裂缝演变规律、研发经济高效环保的改性材料等方面工作。

**关键词:** 分散性土; 分散机理; 鉴别方法; 工程应用; 研究进展

**中图分类号:** TU411.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2019)03-0010-12

## Advances in Research and Engineering Applications of Dispersive Soil

FAN Henghui, ZHANG Lu, YANG Xiujuan, JU Juanli, CHEN Tao, KANG Shunxiang

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Dispersive soil is widely distributed all over the world, especially in arid and semi-arid areas. It is a kind of special soil with water sensitivity. Its water erosion resistance is very low. It is easy to cause piping, caves, gullies and other damages, which poses a serious threat to the safety of buildings. In this paper, the definition, dispersive mechanism, identification methods and modification application of dispersive soil were analyzed, summarized and prospected. Dispersive soil is a kind of cohesive soil prone to loss, which soil particles will disperse under very low hydraulic gradient when the repulsion force between soil particles exceeds the attraction force in low salinity or pure water. The formation mechanism of dispersive soil is that the content of cementing substance in soil, especially clay particles is low or the soil contains more sodium ions and is alkaline. In general, laboratory tests such as double hydrometer test, crumb test, pin-hole test, soluble cations in pore water test and exchangeable sodium percent test are used to synthetically judge the dispersion of soil samples. Field investigation and empirical model can be used as auxiliary means. In dispersive soil engineering applications, the water stability of dispersive soil can be improved by physical protection, chemical modification or comprehensive treatment, among which chemical modification is the most fundamental method. In future researches, the relationship between repulsion and attraction of soil particles, the seepage damage of dispersive soil, especially the evolution law of soil cracks, and cost-effective, efficient and clean modified materials should be paid more attention.

**Keywords:** dispersive soil; dispersive mechanism; identification methods; engineering application; research advance

分散性土属于一种水敏性的特殊土, 抗水蚀能力很低, 容易形成管涌、洞穴、冲沟破坏, 对建筑物的

安全性造成严重威胁。分散性土在世界各地特别是干旱半干旱地区分布广泛, 在澳大利亚、美国、泰国、

收稿日期: 2019-03-03

修稿日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579215, 51379177); 国家重点研发计划项目专题(2017YFC0504703-02)

作者简介: 樊恒辉(1973—), 男, 山西运城人, 博士, 研究员, 主要从事特殊性土的工程性质及改良技术研究。E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn.

印度、西班牙、加拿大、南非、伊朗等国均有发现,在我国黑龙江、山东、海南、新疆、青海、陕西、山西等地的工程实践中也有发现。

人们很早就发现某些黏性土具有遇水分散的现象,在上个世纪的 30 年代当时的农学家就认识到具有自行分散的土壤存在<sup>[1]</sup>。分散性土在工程领域的发现与研究则相对较晚,美国俄克拉荷马州 Wister 大坝在 1949 年第一次蓄水时发生了严重的管涌破坏,Casagrande 研究认为该坝采用的防渗土料具有高度分散性<sup>[2]</sup>。这可能是关于分散性土修筑堤坝发生破坏的最早的报道。俄克拉荷马州从 1950 年起,修建了 1500 多座防洪土坝,其中 11 座在刚蓄水就遭受破坏<sup>[3]</sup>;另外,该州修建的 US 59 公路道路路基在雨水作用下冲蚀破坏严重,Jeff<sup>[4]</sup>研究认为其原因是路基采用分散性土造成的。澳大利亚 Cole 等<sup>[5]</sup>对澳大利亚西部均质坝的管涌情况进行了研究,调查表明 10% 以上的土坝事故是由于土体物理化学变化引起的,而这与土的分散性有关。Gutiérrez 等<sup>[6]</sup>研究发现西班牙的 San Juan 水库大坝遭受破坏的原因也是由于坝体防渗土料属于分散性。Aramsri 等<sup>[7]</sup>对泰国灌溉工程的分散性土分布进行了分析。Maharaj 等<sup>[8-9]</sup>提出在南非的许多地区分布有分散性土,如果在使用前未准确识别并采取适当的改性措施,则道路路堤会发生管涌、冲沟和材料损失等严重的工程问题。Premkumar 等<sup>[10]</sup>研究发现即使在路堤土中存在少量的分散性土,也会影响接触侵蚀破坏。

国内,最早开展分散性土的研究工作应是黄河水利委员会水利科学研究所,在 20 世纪 70 年代秦曰章<sup>[11]</sup>采用针孔冲蚀法、化学浸提液法和崩解试验三种方法研究了黄河小浪底水库防渗土料的分散性。在 80 年代和 90 年代期间,黑龙江引嫩工程<sup>[12]</sup>、海南省岭落水库<sup>[13]</sup>发生洞穴、管涌及溃坝,经研究发现筑坝土料属于分散性土。从 90 年代初开始,由于水利工程的发展,科研工作者结合工程实践对黏性土的分散性进行了大量的研究,如河南的陆浑大坝<sup>[14]</sup>、山西的上马水库<sup>[15]</sup>、新疆的引额济克(乌)工程<sup>[16]</sup>、山东的官路水库<sup>[17]</sup>、青海的宁木特水利枢纽工程<sup>[18]</sup>、浙江的天子岗水库和山东青水库<sup>[19-20]</sup>、宁夏的文家沟水库<sup>[21]</sup>、马家树水库<sup>[22]</sup>和南坪水库<sup>[23]</sup>、内蒙古的东台子水库<sup>[24]</sup>等。从目前的资料分析来看,分散性土在我国分布广泛,多位于干旱半干旱地区土体呈碱性的区域。因此,在工程实践中应重视与研究分散性土。

自 20 世纪 50 年代在美国发现分散性土,并认识到它对堤坝、渠基、边坡等具有破坏作用后,世界上许多国家的科研工作者对分散性土的产生原因、评价方法、工程特性与应用做了大量细致的研究工作,取得了有价值的成果,为认识和评价分散性土提供重要的支撑。本文从分散性土的定义与内涵、分散机理、鉴定方法、改性应用等方面对近年来在分散性土研究方面的工作做一梳理,并提出研究中存在的若干问题及研究方向。

## 1 分散性土的定义与内涵

分散性土具有遇水分散流失的特征,其抗冲蚀能力很低。分散性土在有的文献中被称之为“分散性黏土”。笔者认为可能“分散性土”更为恰当,因为“黏土”一词在土的工程分类中有明确的概念与含义。如果称之为“分散性黏土”,就会认为“分散性土”属于“黏土”。分散性土应属于一种“黏性土”,而不是“黏土”。通常所述的黏性土是指液限大于 25%,塑性指数大于 6,黏粒含量大于 10% 的黏质土和粉质土。为了不产生混淆,建议采用“分散性土”。

在不同的文献中,分散性土定义与表述有所区别,不尽一致。如在 ASTM 标准<sup>[25]</sup>中,分散性土是一种在低含盐浓度的水中,不需要明显的机械辅助作用就能够容易快速产生分散的土。Stumpf 在灾害百科全书中如此描述:分散性土是易受地下水或表面水高度侵蚀的天然的富含黏粒含量的土<sup>[26]</sup>。Mohanty 等<sup>[27]</sup>将与水接触时很容易被迅速冲走的低盐浓度土称为分散性土。Djokovic 等<sup>[28]</sup>给出分散性土的定义是:分散性土是一种特殊类型的细粒土,其中黏土颗粒在水的存在下分散(反絮凝),形成胶体分散体系。

国内许多专家学者亦从不同角度对其进行定义。秦曰章<sup>[11]</sup>、岳宝蓉等<sup>[15]</sup>从微观力学角度,认为黏性土的分散性是指土体在缓慢流动的水中或在静水中,由于土粒表面薄膜水的增厚,土粒之间排斥力超过吸引力(范德华力),使得黏土胶粒进入悬液内并产生随水流冲蚀的现象;刘杰<sup>[29-30]</sup>、李春万<sup>[31]</sup>和崔亦昊等<sup>[32]</sup>从崩解性质角度,认为黏性土的分散性是指在纯净的水中呈团聚体的黏性土能全部或大部分分散成原级颗粒的性能;卢雪清<sup>[33]</sup>等和党进谦等<sup>[34]</sup>从工程破坏角度,认为分散性土具有雨水冲蚀流失特征,具体表现为堤坝在低含盐量渗流水作用下发生管涌破坏,在雨水作用下发生淋蚀破坏。

在国内的相关规范中,分散性土的定义也有所

区别。《碾压式土石坝设计规范》<sup>[35]</sup> (DL/T 5395—2007)、《水电水利工程天然建筑材料勘察规程》<sup>[36]</sup> (DL/T 5388—2007)和《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》<sup>[37]</sup> (SL 251—2000)给出分散性土的定义是:在低含盐量水中(或纯净水中)离子相互的排斥力超过了相互吸引力,导致土体的颗粒分散的黏性土。《小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范》<sup>[38]</sup> (SL 189—2013)、《碾压式土石坝设计规范》<sup>[39]</sup> (SL 274—2001)和《岩土工程基本术语标准》<sup>[40]</sup> (GB/T 50279—98)给出分散性土的定义是:遇水尤其是遇纯水容易分散,钠离子含量较高,大多为中、低塑性的黏土。《水利水电工程地质勘察规程》<sup>[41]</sup> (GB 50487—2008)给出分散性土的定义是:遇水后即分散成原级颗粒的土。《岩土工程基本术语标准》<sup>[42]</sup> (GB/T 50279—2014)给出分散性土的定义是:钠、钾离子含量较高,遇水尤其是纯水容易分散成散粒结构的土。

由黏性土-水-电解质系统中各组分之间的关系可知,黏性土颗粒在水介质环境中出现凝聚与分散的现象是土颗粒间的斥力与引力此消彼长的结果,当引力大于斥力时,表现为凝聚;当斥力大于引力时,表现为分散。因此,笔者认为分散性土的定义应包含以下内涵:(1)在低含盐量水中或纯净水中表现出分散性;(2)颗粒间的排斥力超过吸引力,导致颗粒分散;(3)分散性土属于黏性土范畴;(4)在静水或缓慢流动的水中具有遇水分散流失的工程特性。因此,分散性土的定义应为:分散性土是一种在水力坡降很低条件下由于土颗粒间的排斥力超过吸引力而导致土体产生分散流失的黏性土。

## 2 黏性土的分散机理

分散性土遇水分散流失的特性是自身物理化学性质的综合体现,且受外界水的因素影响,因此它的分散机理比较复杂。研究表明,影响黏性土分散的因素有内在因素和外在因素,其中内在因素包括土体的含水率、密度等物理力学性质以及阳离子含量与种类、酸碱度、胶结物、矿物成分等化学性质;外在因素主要是水的离子种类和含量、酸碱度。在这些众多的因素中,单一的因素在阐述黏性土的分散机理方面显得“力不从心”,往往需要从多因素角度出发才能合理解释黏性土的分散机理。这些因素依据属性不同,可归结为物理和化学作用两个方面,并且在这些因素中还有主要因素和次要因素之分。

Fletcher 等对美国西南部亚利桑那州一条河谷

的土壤流失原因进行了研究,发现是由于土壤中含有大量交换性的钠离子而导致土壤产生分散<sup>[2]</sup>。Ingles 等<sup>[43]</sup>认为,分散性土中的黏土矿物大部分由蒙脱石组成,并且具有高含量交换性钠离子;孔隙水中所溶解的钠离子同其他碱性阳离子(钙和镁)的相对数量是决定黏土产生分散管涌程度的一个主要因素;如果土中的黏土颗粒主要由蒙脱石组成,一般都具有高的交换性钠离子百分比和管涌潜力,某些伊利土也是高度分散性的,在高岭石组成的黏土中,具有高的交换性钠离子百分比和高分散性的较少。Sherard 等<sup>[44]</sup>认为,分散性土的分散机理是与土颗粒表面的电学性质有直接的关系,并认为分散性土中含有相当量的蒙脱石,孔隙水中的钠离子含量是决定土是否具有分散性的主要因素。Holmgren 等<sup>[45]</sup>认为分散性土是高钠土。Chorom 等<sup>[46]</sup>认为酸碱度与分散度呈正相关关系。Gutiérrez 等<sup>[6]</sup>在研究西班牙的 San Juan 水库大坝心墙土料时认为高含量的交换性钠离子百分比是导致黏性土分散性的原因。

随着我国水利工程的发展,20 世纪 80 年代发现了大量分散性土的存在,并对其进行了深入研究。洪有纬<sup>[47]</sup>对黑龙江省西部地区 38 个取土点采样分析,发现分散性土破坏地段的出现与盐渍土的出现有明显的一致性,认为钠离子的存在是分散性土产生分散的主导因素。裘孟辛<sup>[48]</sup>对黑龙江南引工程围堤土料和桃山水库坝料分析,认为钠蒙脱石的不稳定结构会引起黏性土分散,高价离子和粒间胶结物会引起黏性土絮凝。王幼麟等<sup>[49]</sup>深入分析了黏土矿物组成、交换性钠离子、孔隙溶液、pH 和分散性的关系,认为蒙脱石类矿物、吸附性钠离子含量、孔隙水中钠离子含量、电解质浓度和 pH 是决定土分散性的重要的物理化学因素。王观平<sup>[50-52]</sup>提出分散性土的分散主要是由水和土两方面决定。水的盐浓度是外因,土的内在矿物成分是内因。只要含有一定量的蒙脱石(南部引嫩工程中蒙脱石含量只有全土的百分之十几),且有高含量可交换性钠的土,就有可能是分散性土。陈式华等<sup>[20]</sup>、曹挺新<sup>[53]</sup>和曹敏等<sup>[54]</sup>研究发现脱钾伊利石如果大量吸附钠离子会具有钠蒙脱石一样的高分散性。邓铭江等<sup>[16]</sup>、杨昭等<sup>[55]</sup>和于为等<sup>[56]</sup>对新疆筑坝土料研究,王立文等<sup>[57]</sup>对黑龙江水库坝料研究,一致认为黏性土分散是因为含有一定量的钠蒙脱石。魏迎奇等<sup>[58]</sup>认为土的分散性与其颗粒组成、土颗粒相对密度和界限含水率没有直接关系,但与 pH 值有较密切的关系,分散性土的 pH 值明显高于非分散性土,它可作

为辅助性的鉴定指标。高明霞等<sup>[23]</sup>对宁夏南坪水库筑坝土料进行分散性鉴定试验,分析认为土样产生分散的主要因素是蒙脱石和钠离子较多、土体碱性较强、黏粒含量低。李洪良等<sup>[59]</sup>采用碎块试验研究介质环境中阳离子和酸碱度变化对黏土分散性的影响,认为黏性土产生分散性的必要条件是土体中含有较多的钠离子和呈强碱性,蒙脱石含量的高低不是分散性土的必要条件。赵高文等<sup>[60]</sup>应用灰色系统理论对实际工程中123组土样的物理、化学和矿物学性质以及土体分散性试验结果进行分析,认为单纯的高浓度钠离子不是土体产生分散性的充分条件,不能单纯的将钠离子含量或蒙脱石含量作为预测和评价土体分散性的指标。

在水质对黏性土的分散性研究方面,樊恒辉等<sup>[61]</sup>、孙晓明等<sup>[62]</sup>和田堪良等<sup>[63]</sup>认为土的分散性是决定分散破坏的内因,水质是决定分散破坏的外因。于润波等<sup>[64]</sup>对黑龙江西部引嫩平原许多用分散性土修筑的水利工程进行研究,发现较纯净的雨水是土体发生冲蚀破坏的主要因素。这也就揭示了某些大坝的防渗土料为什么是分散性土而大坝仍在安全运行的原因。

由于单一的因素往往不能对出现分散特性的土样做出合理的解释,因此有部分专家学者对分散性土的分散机理从多因素角度进行分析研究。蒋国澄<sup>[65]</sup>认为分散性土大致要具备3个条件:(1)含有一定数量的晶格不稳定的钠蒙脱石类黏土矿物,且交换性阳离子中以钠为主;(2)颗粒间没有足够抑制土粒分散和膨胀的胶结物,如有机质、碳酸盐以及游离铝铁氧化物等;(3)不致促进土粒絮凝的碱性及低盐浓度介质环境。刘杰等<sup>[30]</sup>认为形成分散性的条件有3个:(1)含有一定量的不稳定结构的黏土矿物和交换性钠离子,即钠蒙脱;(2)胶结物质含量不足以抑制膨胀和分散作用;(3)高pH值的碱性介质环境。樊恒辉等<sup>[66]</sup>基于土-水-电解质系统的双电层理论,对土的物理化学及矿物学性质与分散性之间的关系进行了研究,认为分散性土的内在因素主要有两种情况,一种情况是土体的黏粒含量较低,由黏粒含量低引起的分散称之为物理性分散;另一种情况是土体中含有较多的钠离子和酸碱度呈碱性,而且这两种因素缺一不可,这种原因引起的分散性称之为化学性分散。黏粒含量低、钠离子含量高和酸碱度呈碱性是黏性土产生分散性的主要原因,其他矿物成分、土体含水率与密度等因素只是表象,而不是主要原因。

综上所述,分散性土的分散机理是极其复杂的。研究分散机理对于分散性土的鉴定方法、改性应用具有非常重要的理论指导意义。对于物理分散性土而言,主要是土中的胶结物质较低而导致的。土中的胶结物质种类很多,归纳起来,大致有三类,黏粒、有机质和一些简单的无机胶体。黏粒具有很大的表面积,黏接力很强,在土壤的团粒形成中起着重要的作用。良好团粒结构有一定的水稳定性。有机质同样也是一种胶体,不仅促进团粒的形成,而且可以降低土体的酸碱度(pH值)。简单的无机胶体主要是氧化铁、氧化铝、碳酸钙(镁)及其他无机物。它们成胶膜包在土粒的表面,当它们由溶胶转变为凝胶时,把土粒胶结在一起。在这三类胶结物中,其中黏粒含量影响最为显著。黏粒颗粒细小,具有很大的表面积,黏接力很强,与土体的诸多性质,如分散性、膨胀性、吸水性、渗透性等有关。对于化学性分散性土来说,其分散机理主要依照双电层理论来解释。当黏土颗粒表面电荷恒定时,扩散层厚度与离子价成反比,与离子浓度的平方根成反比,而与介电常数和温度的乘积的平方根成正比。在实际情况下,介电常数和温度的变化对双电层的厚度没有多大影响,而溶液中离子的浓度和化合价对扩散双电层的厚度具有明显的影响。因此,离子价越高,离子浓度越大,扩散层的厚度越薄。一般来说,双电层越薄,悬浮液中颗粒的絮凝倾向就越大,即颗粒分散性能就越弱。在自然界形成的土体中,阳离子一般包括 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 和 $\text{K}^{+}$ ,其中最重要的是 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^{+}$ 。在浓度、温度等其它因素相同的条件下,一价 $\text{Na}^{+}$ 的双电层厚度是二价 $\text{Ca}^{2+}$ 的2倍;此外,在土-水-电解质系统的溶液中水化钠离子的半径大于水化钙离子的半径。因此,若土样中含有大量的钠离子,使得土体颗粒间的排斥力大于吸引力,净势能表现为斥力,土体产生分散。酸碱度则通过影响土颗粒表层的电荷数来影响土颗粒表面的双电层厚度,碱性越强,土颗粒表面的电荷数越多,吸附的钠离子越多,导致双电层越厚,颗粒间的间距越大,斥力大于引力,颗粒产生分散。因此,从双电层理论来分析,土体中的钠离子含量和酸碱度是导致双电层厚度变化的主要原因,即分散性土产生分散与钠离子和酸碱度是密不可分的。

需要注意的是,前面讨论的分散机理均在静水环境下。分散性土的典型工程性质是抗冲蚀性差。分散性土遇水发生分散为原级的黏土颗粒,在水力坡降很低的缓慢流动的水中这些原级的黏土颗粒极

易随水流失,在堤坝内部渗流水作用下会发生管涌破坏,在堤坝表面雨水冲刷作用下会发生冲蚀破坏,这是分散性土引发工程破坏的作用机理。目前,对水利工程中分散性土渗透破坏特别是土体内部裂缝演变规律及表面冲蚀破坏研究的文献较少。

### 3 分散性土的鉴定方法

常规的土力学参数,诸如颗粒相对密度、颗粒级配、界限含水率、黏聚力、摩擦角等不能反映土体的分散程度。由于分散性土的复杂性,单一的指标往往也不能准确地鉴定分散性土,目前多采用综合鉴定方法。这些方法包括野外调查、室内试验和经验模型等。

#### 3.1 野外调查

分散性土的鉴定应当从野外调查开始。有分散性土分布的地区,下雨后路旁的水沟、水坑和河道里流的水都是浑浊的,水流过后水坑里的水仍然是浑的,长久不会澄清。水坑干涸后坑底会留下很细的黏土沉积,干后出现龟裂。在有坡度的地方会出现冲沟和孔洞等异常冲蚀形式的表面迹象(见图 1,图 2)。



图 1 852 灌区道路雨后水坑浑浊

#### 3.2 室内试验

(1) 碎块试验<sup>[67]</sup>。将保持天然含水率的土块

或按照试验要求制成  $1 \text{ cm}^3$  左右的土块,放入盛有约 200 ml 纯水的 250 ml 烧杯中,浸放 5 min ~ 10 min 后观察土块中胶粒的分散特征(判别标准见表 1)。



图 2 龙泉寺水库坝料场坝坡冲蚀情况

表 1 碎块试验判别标准

土类别	浸水后特征
非分散性土	没有反应。土块不崩解,或崩解后水中没有出现浑浊,或稍浑浊后很快又变清。
过渡性土	轻微反应。在崩解的土块表面附近或周围有轻微的肉眼可见的胶粒悬液产生浑浊水。如果“云雾状”明显,则划分为第 3 等级;如果“云雾状”不明显,则划分为第 1 等级。
分散性土	中等反应。在崩解的土块周围或表面可明显地看到黏粒悬液产生的云雾状。“云雾状”在杯底扩散 10 mm 左右。
高分散性土	严重反应。在整个杯底大量的浓黏粒悬液呈云雾状出现。有时,由于土粒的分散而无法看到原来土块的表面。通常,在烧杯的各个方向均可容易地看见土粒胶粒悬液。

(2) 针孔试验<sup>[68]</sup>。针孔试验是在特制的针孔试验装置中,按试验要求制样(压实度控制在 0.95 以上),在试样的中部穿一直径 1.0 mm 的轴向细孔,然后用纯水(或试验要求用水)进行冲蚀试验,分别在 50 mm、180 mm、380 mm、1 020 mm 水头下观察针孔受水冲蚀的情况(判别标准见表 2)。

表 2 针孔试验判别标准

土类别	编号	水头 /mm	在某一水头下的持续时间/min	最终流量 / $(\text{ml} \cdot \text{s}^{-1})$	试验结束时流出水的雾状情况		最终孔径 /mm
					侧视	顶视	
分散性土	D1	50	5	1.0 ~ 1.4	浑浊	很浑浊	$\geq 2.0$
	D2	50	10	1.0 ~ 1.4	较浑浊	浑浊	$> 1.5$
	ND4	50	10	0.8 ~ 1.0	轻微浑浊	较浑浊	$\leq 1.5$
过渡性土	ND3	180	5	1.4 ~ 2.7	肉眼可见	轻微浑浊	$\geq 1.5$
		380	5	1.8 ~ 3.2	肉眼可见	轻微浑浊	—
非分散土	ND2	1020	5	$> 3.0$	清澈	肉眼可见	$< 1.5$
	ND1	1020	5	$\leq 3.0$	完全清澈	完全清澈	1.0

(3) 双比重计试验<sup>[69]</sup>。双比重计试验是对土样进行两次比重计试验来测定黏粒( $< 5 \mu\text{m}$ )或胶粒

( $< 2 \mu\text{m}$ )含量,第一次是常规的加分散剂、煮沸、搅拌的方法,得到一条曲线;第二次不加分散剂,先将

土样放在盛有一定量纯水的抽滤瓶中,并与真空泵相连接抽气 10 min,然后把土水悬液冲洗到量筒中,加纯水至 1 000 ml,倒转量筒 30 次并来回摇晃,让黏土颗粒自行水化分散,得到另一条曲线。求得两次试验的黏粒或胶粒含量,计算分散度(判别标准见表 3)。

$$D = \frac{N(m, nd)}{N(m, d)} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $D$  为分散度,%;  $N(m, nd)$  为没分散措施的黏粒或胶粒含量,%;  $N(m, d)$  为有分散措施的黏粒或胶粒含量,%。

表 3 双比重计试验判别标准

土类别	分散度/%
非分散性土	< 30
过渡性土	30 ~ 50
分散性土	> 50

(4) 孔隙水可溶性阳离子试验<sup>[70]</sup>。将土样含水率配到液限,采用抽滤装置或离心机将土水分离,得到孔隙水溶液,测定其中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$  含量,然后计算出孔隙水可溶性阳离子总量(TDS)、钠百分比(PS)。

$$\text{TDS} = C_{\text{Ca}} + C_{\text{Mg}} + C_{\text{Na}} + C_{\text{K}} \quad (2)$$

$$\text{PS} = \frac{C_{\text{Na}}}{\text{TDS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{Na}}$  为孔隙水中钠离子含量, mmol/L;  $C_{\text{K}}$  为孔隙水中钾离子含量, mmol/L;  $C_{\text{Ca}}$  为孔隙水中钙离子含量, 1/2 mmol/L;  $C_{\text{Mg}}$  为孔隙水中镁离子含量, 1/2 mmol/L; TDS 为孔隙水中阳离子总量, mmol/L; PS 为钠百分比。

判别标准:以 TDS 为横坐标, PS 为纵坐标在半对数坐标纸中绘制 PS 和 TDS 关系曲线图,见图 3。如果土样的点落在 A 区,属于分散性土;落在 B 区,属于非分散性土;落在 C 区,属于过渡性土。

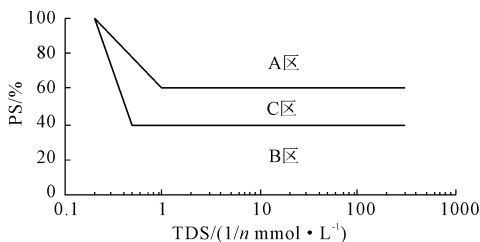


图 3 土的分散性与 TDS、PS 关系图

(5) 交换性钠离子百分比试验<sup>[71]</sup>。本方法是测定土中阳离子交换量(CEC)和交换性钠离子含量,求出交换性钠离子百分比(ESP)。

$$\text{ESP} = \frac{C_{\text{Na}}}{\text{CEC}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $C_{\text{Na}}$  为交换性钠离子含量, cmol/kg; CEC 为阳离子交换量, cmol/kg。

判断标准:

ESP = 7% ~ 10%, 属中等分散性土;

ESP ≥ 15%, 属高分散性土, 即有严重管涌的可能性。

由于黏性土的复杂性,对于同一种土采用上述的 5 种试验方法进行鉴定,往往出现结果相互之间不一致的情况。如何在试验的基础上准确鉴定黏性土的分散性是岩土工程师们关心的另一个主要问题。根据最后评价时采用的试验方法多少,分为单一判别法和综合判别法。单一判别法指以一项试验结果作为判别依据。针孔试验模拟了土体裂缝在水流作用下的冲蚀现象,试验过程直观,一般认为其试验结果可靠度高,成为很多学者判别的主要依据。付希文等<sup>[72]</sup>提出在讨论静态水环境中土的分散性时,以双比重计试验为主;着重考虑水流对渠道边坡的冲蚀作用时,应以针孔试验结果为主要判断依据。陈劲松等<sup>[73]</sup>提出以针孔试验和双比重计试验中最不利的试验结果进行分散性判别。综合判别法指通过两项或两项以上的试验结果综合分析。综合判别法又可分为多数相同法和权重分析法。付希文等<sup>[72]</sup>提出在研究土的分散机理时,以针孔试验与交换性钠离子百分比试验为主;曹敏等<sup>[54]</sup>提出当 3 种或 4 种试验方法中有 2 种判断为分散时,该土为分散性土。张旭东等<sup>[74]</sup>以针孔试验为基础,结合碎块试验和双比重计试验结果进行分析,如果针孔试验判定为分散性土,在碎块试验和双比重计试验中只要有结果为分散性土的,则综合判定为分散土;如果针孔试验为过渡性土,在碎块试验和双比重计试验中只要有分散土,则综合判定为分散性土;如果针孔试验结果为非分散性土,在碎块试验和双比重计试验的结果中只要有过渡性土的,则综合判定为过渡性土;否则为非分散土。樊恒辉等<sup>[75]</sup>赋予双比重计、碎块、针孔、孔隙水可溶性阳离子和交换钠离子百分比等试验方法的权重值,分别取 20%、20%、40%、10%、10%。分散性的权重大于 50% 时,土样属于分散性土。分散性的权重等于 50% 时,如果过渡性的权重大于等于 20%,则属于分散性土;反之,则属于过渡性土。分散性的权重小于 50% 时,如果“过渡性 + 分散性”的权重大于等于 50%,则为过渡性土,否则属于非分散性土。通过计算权重值可以

比较客观定量地评价土的分散性。巨娟丽等<sup>[76]</sup>也提出了类似的权重分析法,但是权重值略有不同。

### 3.3 判别黏性土分散性的经验公式

根据黏性土-水-电解质系统的理论,黏性土分散机理包括三个方面,一是黏粒含量低,二是含有大量的钠离子,三是酸碱度呈强碱性。樊恒辉等<sup>[66]</sup>基于黏性土的分散机理,构建了判别黏性土分散性的经验公式,并提出了物理性分散土和化学性分散土的分类。根据黏性土分散性的经验判别公式可对土样的分散性进行判别,并可分析其分散机理。

$$F_1 = 4 - 0.01(2W_L + P_c) \quad (5)$$

$$F_2 = 4 - 0.01(2W_L + P_c - P_s) \quad (6)$$

$$F_3 = 4 - 0.01(2W_L + P_c - P_s) + 0.1\text{pH} \quad (7)$$

式中: $F_n$ 为土的分散值; $W_L$ 为液限,%; $P_c$ 为黏粒( $< 0.005 \text{ mm}$ )含量,%; $P_s$ 为钠百分比,%; $\text{pH}$ 为酸碱度。

判别标准:

(1) 如果  $F_1$  值大于 3.26,则土样属于物理性分散土;如果  $F_1$  值小于等于 3.26,则继续引入钠离子百分比计算  $F_2$  值。

(2) 如果  $F_2$  值大于 4.06,土体属于分散性土;如果小于 3.16,属于非分散性土;如果在 3.16 和 4.06 之间,不能确定,则继续引入酸碱度计算  $F_3$  值。

(3) 如果  $F_3$  值大于 4.50,可判别为化学性分散土;介于 4.00 和 4.50 之间,可判别为过渡性土;小于 4.00,可判别为非分散性土。

另外,巨娟丽等<sup>[77]</sup>基于主成分分析法,以影响黏土分散性的物理、化学及矿物学指标为基础,建立了黏土分散性评价模型,对某一水电站 12 组黏土土样的分散性程度大小进行了评价,发现该评价模型的评价结果与室内试验观测到的结果基本一致。

## 4 工程应用

分散性土具有遇水易分散的特性,抗冲蚀能力很低,对水工建筑物安全威胁很大。在实际工程建设中,采用非分散性土替代分散性土的换土方法是解决分散性土的最简单、最实用的工程技术。然而,由于经济成本、环境保护、施工周期等影响,换土方法具有很大的局限性。因此,在许多情况下对分散性土采用物理保护、化学改性或综合处治的措施,提高分散性土的水稳性。

物理保护处理方法是指仅涉及物理过程,而没有化学过程的处理方法,如采用防渗土工膜将分散

性土和水隔离、设置适当级配的砂反滤层截住土体细颗粒等。澳大利亚旗杆心墙坝,挖开至岩面浇筑混凝土齿墙,岩面及齿墙顶都填一层膨润土,上面仍采用分散性土填筑。巴西的苏帕雷定柯心墙坝,在心墙下游面设置了反滤排水竖井处理<sup>[78]</sup>。中引八干渠工程<sup>[79-80]</sup>、大庆地区防洪工程双阳河水库均质坝<sup>[3,35]</sup>、新疆三坪水库心墙坝<sup>[35]</sup>,对分散性土段采取了土工膜防渗措施处理。山西上马水库均质坝上游进行了沥青玻璃丝油毡防渗处理<sup>[15]</sup>。阚瑞清等<sup>[81]</sup>对南引 17 号围堤 0+360 段分散性土样 S-4 进行改性研究,发现砂反滤和土工布反滤是防止分散性土工程破坏的有效措施。袁光国等<sup>[82]</sup>结合西藏 S 水电站土石坝工程,对采用分散性土与砂砾石掺合改性后作为心墙防渗体的填筑材料进行了探讨,研究发现在分散性土中掺入级配连续的砂砾石料,将分散性土改性为宽级配土作心墙防渗体的填筑材料,并作好恰当的反滤保护,是切实可行的工程措施。Abbasi 等<sup>[83]</sup>提出在分散性土中加入纳米黏土可显著降低其分散性。王志兴等<sup>[84]</sup>根据北部引嫩总干渠分散性土特征,推荐采取明渠衬砌的隔离方案,即土工膜隔离分散性土与低矿化度水,外部铺设混凝土板。

化学处理方法包含两个方面,一是改性分散性土,即采用石灰、水泥、粉煤灰、铝盐、钙盐等材料使分散性土或过渡性土变为非分散性土;二是改性水质,即在库水水体中掺加石膏以对水质进行改造等。这些改性材料加入水体或土体后,与土体的土颗粒发生诸如水化水解反应、团粒化作用、碳酸钙反应、阳离子交换反应等,达到提高分散性土的水稳性。洪有纬等<sup>[47]</sup>、阚瑞清等<sup>[81]</sup>对南引 17 号围堤土料, Roth 等<sup>[85]</sup>对巴西 Oxisol 黏土,马秀媛等<sup>[17]</sup>对青岛市官路水库筑坝土料,李华鑫等<sup>[86]</sup>对大屯水库、岭落水库、官路水库筑坝土料,樊恒辉等<sup>[22]</sup>对宁夏马家树水库筑坝土料,Consoli 等<sup>[87]</sup>对巴拉圭西部某处低塑性土料,张路等<sup>[88]</sup>和张勇等<sup>[89]</sup>对黑龙江省灌区渠基土料,掺入不同比例的石灰进行改性研究,证明了石灰具有很好的改性效果。李兴国等<sup>[90]</sup>对非洲索马里某经援工程 4 组土料和我国黑龙江某渠道工程 4 组土料掺加碱性氧化钙和中性氯化钙进行研究,发现两种钙盐只要用量达到要求,都能将分散性土改良为非分散性土,认为掺加碱性氧化钙有一些副作用,掺加中性氯化钙效果更好。缪元勋<sup>[91]</sup>、杨昭等<sup>[55]</sup>和邓铭江等<sup>[16]</sup>在“635”水利枢纽筑坝土料中掺入额河水、石灰粉及掺入 1% 的石灰粉和额河水

溶液,发现均能达到改性目的。赵高文等<sup>[92]</sup>对掺加氯化铝、氯化镁、氯化钙、氧化钙的改性化学分散性土的改性效果分析,王中妮等<sup>[93]</sup>对掺加氯化铝、三氯乙酸和聚丙烯酰胺的改性化学分散性土的改性效果分析,严应佳等<sup>[94]</sup>对掺加粉煤灰的改性化学分散性土的改性效果分析,发现这些改性剂都可以将分散性土改性为非分散性土。陈劲松等<sup>[73]</sup>对某大坝心墙土料掺加不同比例的水泥或生石灰改性,发现在水泥掺量3%或者生石灰掺量3%~5%的情况下,基本可以消除土料的分散性。巨娟丽等<sup>[76]</sup>对大石峡水电站筑坝土料掺入0.26%的氯化铝或0.35%的氯化钙改性,发现分散性改良效果显著。Haliburton等<sup>[95]</sup>研究认为熟石灰、硫酸铝和氯化钠都是有效的化学稳定剂,可以降低分散性土侵蚀的可能性。Vakili等<sup>[96-98]</sup>研究了火山灰、ZELIAC(包括沸石、活性炭、石灰、稻壳灰、水泥等天然存在低成本的原料)、木质磺酸盐对分散性土的改性效果。Indraratna等<sup>[99-100]</sup>和 Vinod等<sup>[101]</sup>研究了木质素磺酸盐和普通硅酸盐水泥两种化学稳定剂在分散性土中的作用,结果表明0.6%水泥对分散性土的稳定效果优于0.6%木质素磺酸盐。Turkoz等<sup>[102-103]</sup>研究发现添加 $MgCl_2$ 溶液可有效改善分散膨胀性黏土、证明了沸石和水泥对分散性土的改性效果。Goodarzi等<sup>[104]</sup>研究发现炉渣有很好的改性效果。Savas等<sup>[105-106]</sup>研究发现2%石灰和3%天然沸石是降低分散土膨胀压缩潜力的最有效的稳定剂,C类粉煤灰比F类粉煤灰对分散土的稳定作用更为有效。Ouhadi等<sup>[107]</sup>、Jafari等<sup>[108]</sup>也研究了铝盐改性分散性土的效果。澳大利亚班尔加心墙坝<sup>[3,35,78]</sup>、南引水库第14号围堤<sup>[57]</sup>、麦洛维工程黏土心墙坝<sup>[109]</sup>、大庆地区防洪工程两处分散性土破坏典型段<sup>[110]</sup>,都是通过土料中掺入一定量的石灰,使分散性土变为非分散性土。在化学改性分散性土方面的研究与实践比较多,改造库水方面的比较少。目前,澳大利亚墨尔本市附近的供水工程系统,澳大利亚卡迪尼亚心墙坝<sup>[78]</sup>、非洲 Senekal 心墙坝<sup>[9]</sup>,都通过将石膏放入水中的办法,使混浊液絮凝澄清。

综合处理方法是指分散性土应用中既涉及化学过程,又涉及物理过程的处理方法。美国 Los Esteros 心墙坝,防渗体下游填筑反滤砂,底部填筑石灰土。澳大利亚基尔莫均质坝和瓦兰心墙坝,上游坡填筑石灰稳定土,下游坡脚填筑石灰稳定土和砾石排水。阿根廷乌鲁姆坝在心墙底部基岩面浇40 cm厚的钢筋混凝土垫座,其上填2 m厚的掺石灰黏土,心墙上

下游坡面增设5 m厚的砂反滤层。伊朗塔里干土石坝在防渗体上下游填筑反滤砂,底部设混凝土板,其上填筑石灰土。泰国兰清格均质坝,基础加截水墙,上游坡设石灰处理层。泰国会沙韦均质坝,用石灰土保护坝坡,坝顶用沥青护面<sup>[3,35]</sup>。黑龙江省南部引嫩工程第17号均质坝<sup>[12,111]</sup>,上游坡和坝顶用石灰土处理,下游坡用细砂反滤。Vakili等<sup>[97]</sup>提出木质磺酸盐和电渗法共同使用可以增强对分散性土的改性效果。

常用的改性材料包括石灰、水泥、粉煤灰和炉渣。这些材料虽然能够改善土体的分散性,但都具有一定程度的局限,如石灰、水泥会增加土体的脆性;粉煤灰、炉渣等工业废弃物由于地域和运距的限制,获取往往比较困难。另外,这些诸如石灰、水泥等传统的无机材料在生产与应用过程中,需要消耗大量的能源,造成生态环境的破坏。随着生态环境日益受到重视,人们更倾向采用环境友好、绿色环保的材料改性土体的不良工程性质。

微生物诱导碳酸钙沉积(Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation,简称MICP)是目前土体改性研究的热点之一<sup>[112-113]</sup>。MICP技术对于砂土具有较好的固化效果,能够将砂土的无侧限抗压强度提高到20 MPa以上,渗透系数降低到处理前的1%,剪切波速提高4倍。但是,由于黏性土的渗透性比较低、菌液及胶结液渗透慢、微生物繁殖受到影响等原因,MICP技术在黏性土的应用受到一定的限制<sup>[114-115]</sup>。Moraveja等<sup>[116]</sup>采用MICP技术改性分散性土取得了一定的效果,但是发现无法区分MICP改性分散性土到底是MICP生成的 $CaCO_3$ 起作用,还是MICP中的原材料 $CaCl_2$ 起作用,因为MICP需要 $CaCl_2$ 提供钙源,而 $CaCl_2$ 本身就对分散性土具有一定的改性作用。樊恒辉等<sup>[117]</sup>基于自然界溶洞中钟乳石和黄土中钙质结核的形成机理,提出了一种采用岩溶碳酸氢钙(Calcium Bicarbonate from Karst,简称CFK)改性分散性土的方法,并取得了良好的固化效果。

## 5 结 语

(1) 分散性土是一种在水力坡降很低条件下由于土颗粒间的排斥力超过吸引力而导致土体产生分散流失的黏性土,属于一种水敏性的特殊土。根据分散机理的不同,可将其分为物理分散性土和化学分散性土。物理分散性土主要由于土体中的黏粒含量较低;化学分散性土主要由于土体中含有较多的

钠离子和碱性较强。水是黏性土产生分散的诱因,水溶液中离子种类、含量是使土颗粒产生凝聚或分散的根本因素。应分析土-水-电解质系统中各部分的关系,对分散性土的分散机理从理论上做进一步的研究,研究物理分散性土与化学分散性土对水质的不同响应特征及其作用机理,重视土颗粒间的双电层、DLVO 理论与斥力和引力关系等基础性研究。

(2) 分散性土的鉴定可采用野外勘察、室内试验和经验模型等方法。野外勘察主要查看是否具有冲沟和孔洞等异常冲蚀迹象;室内试验主要包括双比重计、碎块、针孔、孔隙水可溶性阳离子和交换钠离子百分比等试验;经验模型通过土的液限、黏粒、钠百分比、酸碱度等参数计算土的分散值,可判别土样的分散性及分类。目前以室内判别结果作为最终判别结果。建议构建基于主成分分析和神经网络等不同数学理论的黏性土分散性的预测模型。

(3) 分散性土的处理方法包括物理处理方法、化学处理方法和综合处理方法。物理处理方法主要包括土工膜防渗隔开分散性土和低含盐量水、设置适当级配的砂反滤截住土体细颗粒等,建议从反滤层的设计准则和土工布的长期效果两个方向进行研究,以更好的服务工程实际。化学处理方法主要包括掺加石灰、水泥、粉煤灰、硫酸铝、氯化钙、氯化铝等材料使分散性土或过渡性土变为非分散性土。综合处理方法则是采用物理和化学方法综合处理,更好满足工程建设需求。建议加强高效、经济、环保等改性材料的研发工作。

#### 参考文献:

- [1] Decker R S, Dunnigan L P. Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test[C]//Sherard J L, Decker R S. Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, American Society for Testing and Material, 1977:94-109.
- [2] Petry T M. Identification of Dispersive Clay Soils by A Physical Test[D]. USA: Oklahoma State University, 1974.
- [3] 钱家欢.分散性黏土作为坝料的一些问题[J].岩土工程学报,1981,3(1):94-100.
- [4] Jeff Dean. Dispersive Clay Embankment Erosion-a Case History[C]//54th Highway Geology Symposium. Burlington, VT, USA, 2003:306-320.
- [5] Cole D C H, Lewis J G. Piping failure of earthen dams built of plastic materials in arid climates[C]//Proceedings of the Third Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sydney: Foundation Engineering/Instiute Enginery, 1960:93-99.
- [6] Gutiérrez F, Desir G, Gutiérrez M. Causes of the catastrophic failure of an earth dam built on gypsiferous alluvium and dispersive clays[J]. Environmental Geology, 2003, 43(7): 842-851.
- [7] Aramsri Phathanasabhon, Somboon Munkumdee, Nirun Singhasunti. Distribution of dispersive soils in irrigation project area in Thailand[C]//29th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok Thailand, 1991:4-7.
- [8] Maharaj A, Rooy LV, Paige-Green P. Revised test protocols for the identification of dispersive soils[J]. Journal of the South African, 2015, 57(1):31-37.
- [9] Maharaj A. The Evaluation of Test Protocols for Dispersive Soil Identification in Southern Africa[D]. RSA: University of Pretoria, 2013.
- [10] Premkumar S, Piratheepan J, Arulrajah A, et al. Experimental study on contact erosion failure in pavement embankment with dispersive clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(4):04015179.
- [11] 秦曰章.黄河小浪底黏性土分散性能的试验研究[J].人民黄河,1981(5):8-12.
- [12] 王观平,张来文,阎仰中,等.分散性黏土与水利工程[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [13] 刘杰.土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M].北京:中国水利电力出版社,2006.
- [14] 缪良娟.陆浑大坝防渗土料的分散性和抗渗强度的试验研究[J].人民黄河,1990(5):25-28.
- [15] 岳宝蓉,金耀华.山西上马水库土坝裂缝原因与防治措施[J].防渗技术,1998,4(3):1-14.
- [16] 邓铭江,周小兵,王金平,等.“635”水利枢纽大坝心墙防渗土料分散性判别及改性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(6):73-77.
- [17] 马秀媛,徐又建.青岛市官路水库分散粘性土工程特性及改性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(4):441-444.
- [18] 巨娟丽,刘俊民,严宝文.宁木特水电站大坝防渗土料分散性试验研究[J].路基工程,2008(2):33-35.
- [19] 陈式华,何耀辉,陈卫芳.天子岗水库坝基土分散性试验研究[J].浙江水利科技,2007(5):7-8.
- [20] 陈式华,何耀辉.山东青水库大坝填土分散性试验研究[J].浙江水利科技,2009(1):34-36.
- [21] 樊恒辉,孔令伟,郭敏霞,等.文家沟水库筑坝土料分散性和抗渗性能试验[J].岩土工程学报,2009,31(3):458-463.
- [22] 樊恒辉,孔令伟,李洪良,等.马家树水库大坝防渗土料分散性判别和改性试验[J].岩土力学,2010,31(1):193-198.
- [23] 高明霞,李鹏,王国栋,等.南坪水库筑坝土料分散

- 机理及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1303-1308.
- [24] 王多姿. 赤峰市东台子水库黏土心墙分散性试验研究[J]. 中国水能及电气化, 2014(10): 52-55.
- [25] Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test: D 4647—93[S]. USA: American Society for Testing and Materials, 1993.
- [26] Bobrowsky P T. Encyclopedia of Natural Hazards[M]. Canada: Simon Fraser University, 2013.
- [27] Mohanty S, Roy N, Singh S P. Strength characteristics of dispersive soil by using industrial by-products[C]//Proceedings of the 1st GeoMEast International Congress and Exhibition, Cairo, Egypt: Contemporary Issues in Geoenvironmental Engineering, 2018: 293-302.
- [28] Djokovic K, Caki L, ŹUšIc N, et al. Methods for assessment and identification of dispersive soils[J]. European Conference on Geotechnical Engineering, 2018, 2(2/3): 205-210.
- [29] 刘杰, 缪良娟. 一般黏性土抗渗强度影响因素的研究[J]. 水利学报, 1984(4): 13-21.
- [30] 刘杰, 缪良娟. 分散性黏性土的抗渗特性[J]. 岩土工程学报, 1987(2): 92-99.
- [31] 李春万. 大坝防渗土料的分散性研究[J]. 西北水电, 2002(1): 51-52.
- [32] 崔亦昊, 谢定松, 杨凯虹, 等. 分散性土均质土坝渗透破坏性状及溃坝原因[J]. 水利水电技术, 2004, 35(12): 42-45.
- [33] 卢雪清, 党进谦, 樊恒辉. 不同介质环境对黏土分散性的影响及分散性黏土改性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 208-214.
- [34] 党进谦, 马晓婷, 孙仲林, 等. 分散性土对心墙土料裂缝冲刷影响的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1103-1107.
- [35] 碾压式土石坝设计规范: DL/T 5395—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [36] 水电水利工程天然建筑材料勘察规程: DL/T 5388—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [37] 水利水电工程天然建筑材料勘察规程: SL 251—2000[S]. 北京: 水利水电出版社, 2000.
- [38] 小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范: SL 189—2013[S]. 北京: 水利水电出版社, 2013.
- [39] 碾压式土石坝设计规范: SL 274—2001[S]. 北京: 水利水电出版社, 2001.
- [40] 岩土工程基本术语标准: GB/T 50279—98[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [41] 水利水电工程地质勘察规程: GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [42] 岩土工程基本术语标准: GB/T 50279—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [43] Ingles O G, Aitchison G D. Soil-Water disequilibrium as cause of subsidence in natural soils and earth embankments[C]//Proceedings of the ToKyo Symposium on Land Subsidence, 1969: 342-353.
- [44] Sherard J L, Decker R S, Ryken R L. Piping in earth of dispersive clay[C]//Proceedings of the ASCE Speciality Conference on the Performance of Earth-supported Structure, Purdue University, 1972: 589-626.
- [45] Holmgren G G S, Flanagan C P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test[C]//Sherard J L, Decker R S. Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, ASTM STP 623, American Society for Testing and Material, 1977: 218-239.
- [46] Chorom M, Regasamy P, Murray R. Clay dispersion as influenced by pH and net particle charge of sodic soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32(6): 1243.
- [47] 洪有伟, 盛守田. 黑龙江省西部地区分散性土工程特性及处理措施[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(6): 42-52.
- [48] 裘孟辛. 桃山水库坝料黏土矿物的定量分析和分散性试验研究[C]//水利水电科学研究院科学研究论文集第20集(岩土工程), 北京: 中国水利水电科学研究院, 1984: 127-134.
- [49] 王幼麟, 鲜于开耀, 刘代清. 分散性土的物理化学特征—兼论某水利工程土料的分散性[J]. 水文地质工程地质, 1986(2): 23-27.
- [50] 王观平. 分散性黏土的分散机理分析[J]. 人民黄河, 1989(4): 24-27.
- [51] 王观平. 黑龙江省南部引嫩工程分散性黏土的研究与处理措施[J]. 水利水电技术, 1992(3): 18-22.
- [52] 王观平. 黏土矿物与分散性黏土[J]. 黑龙江大学学报, 1994(3): 21-25.
- [53] 曹挺新. 分散性土作为坝料问题的探讨[J]. 山东水利科技, 1997(1): 14-16.
- [54] 曹敏, 王豹. 黏土分散性鉴别试验方法比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(3): 97-100.
- [55] 杨昭, 席福来, 陈华. 盐渍土与分散性针孔试验影响[J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 23-24.
- [56] 于为, 马龙, 王秋丽. 新疆玛纳斯河肯斯瓦特水利枢纽防渗土料分散性研究[J]. 土工基础, 2011, 25(3): 77-80.
- [57] 王立文, 林治芳, 刘玉柏. 分散性黏土筑坝质量控制[J]. 黑龙江大学学报, 2008, 35(3): 49-51.
- [58] 魏迎奇, 温彦锋, 蔡红. 分散性黏土鉴定试验的可靠性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(3): 186-190.
- [59] 李洪良, 樊恒辉, 党进谦, 等. 介质环境中阳离子和酸碱度变化对黏土分散性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 26-29.

- [60] 赵高文, 樊恒辉, 陈 华. 影响黏性土分散性的化学因素及机理分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 202-206.
- [61] 樊恒辉, 李 鹏, 高明霞, 等. 水对针孔试验鉴定分散性黏土结果影响的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 42-44.
- [62] 孙晓明, 刘春河, 洪晓晖. 对南部引嫩工程分散性黏土坝的分析[J]. 黑龙江大学学报, 2006, 33(3): 12-15.
- [63] 田堪良, 张慧莉, 樊恒辉. 分散性黏土鉴别方法及工程防治措施研究综述[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 204-209.
- [64] 于润波, 张 滨. 水质对分散性黏土冲刷破坏的影响[J]. 黑龙江大学学报, 2005, 32(3): 23-25.
- [65] 蒋国澄. 黏性土的结构稳定性及其某些特殊性土的性质[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(4): 70-75.
- [66] Fan H H, Kong L W. Empirical equation for evaluating the dispersivity of cohesive soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(7): 989-994.
- [67] Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by the crumb test: D6572[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [68] Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by the pinhole test: D4647[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [69] Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer: D4221[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [70] Standard test methods for pore water extraction and determination of the soluble salt content of soils by refractometer: D4542[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [71] Standard test method for measuring the exchange complex and cation exchange capacity of inorganic fine-grained soils: D7503[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [72] 付希文, 付会成, 杨晓龙, 等. 吉林省大安地区盐渍土的分散性研究[J]. 人民长江, 2011, 42(17): 63-65, 75.
- [73] 陈劲松, 顾缦琴, 盛小涛, 等. 大坝心墙料分散性及处理措施试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(4): 144-150.
- [74] 张旭东, 王 清, 李鹏飞, 等. 乾安“泥林”土体分散性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(11): 1643-1647.
- [75] 樊恒辉, 赵高文, 路立娜, 等. 分散性土的综合判别准则与针孔试验方法的改进[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 248-253, 622.
- [76] 巨娟丽, 樊恒辉, 刘俊民. 大石峡水电站筑坝土料分散性综合判定及改性研究[J]. 水力发电, 2016, 42(11): 114-119.
- [77] 巨娟丽, 樊恒辉, 刘俊民. 基于主成分分析法的黏土分散性评价模型构建[J]. 人民长江, 2015(4): 59-62.
- [78] 顾淦臣. 用分散性黏土筑坝需采取的工程措施[J]. 人民黄河, 1983(3): 13-17.
- [79] 李春红, 王宏伟, 安清平. 中引八干渠工程分散黏土及流砂处理[J]. 黑龙江水利科技, 1996(3): 76-78.
- [80] 吕海臣, 宋 炜. 土工膜在处理中引八干渠工程中分散性黏土上的应用[J]. 黑龙江水利科技, 1997(1): 119-120.
- [81] 阚瑞清, 吴富萍, 盛守田, 等. 分散性黏土渠道边坡的破坏原因与防治措施[J]. 防渗技术, 1998(4): 37-39.
- [82] 袁光国, 李小泉. 黏土的分散性及分散性黏土改性筑坝研究[J]. 四川水力发电, 2006, 25(5): 88-92.
- [83] Abbasi N, Farjad A, Sepehri S. The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(1): 327-335.
- [84] 王志兴, 王天祎. 基于北部引嫩总干渠分散性黏土特征与治理措施[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(12): 5-8.
- [85] Roth C H, Pavan M A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol [J]. Geoderma, 1991, 48(3/4): 351-361.
- [86] 李华奎, 高培法, 穆乃敏. 分散性土的鉴别及改性试验[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(4): 92-95.
- [87] Consoli N C, Samaniego R A Q, Villalba N M K. Durability, strength, and stiffness of dispersive clay - lime blends [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11): 04016124.
- [88] 张 路, 樊恒辉, 车雯方, 等. 黑龙江地区渠道基土工程性质试验分析[J]. 水利水电工程学报, 2018(2): 85-92.
- [89] 张 勇, 樊恒辉, 杨秀娟, 等. 黑龙江省渠道分散性土和膨胀土的工程危害及处理方法[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 164-169.
- [90] 李兴国, 许仲生. 分散性黏土的试验鉴别和改良[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 62-66.
- [91] 缪元勋. “635”水利枢纽筑坝土料改性研究[J]. 新疆水利, 1996(5): 12-18.
- [92] 赵高文, 樊恒辉, 陈 华, 等. 基于黏性土分散机制的分散性土化学改性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 210-213.
- [93] 王中妮, 樊恒辉, 贺智强, 等. 分散性土改性剂对土的分散性和抗拉强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 425-432.
- [94] 严应佳, 樊恒辉, 杨秀娟. 粉煤灰改性分散性土的工程特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(4): 88-96.

- [95] Haliburton T A, Petry T M, Hayden M L. Identification and treatment of dispersive clay soils[R]. Oklahoma State University Report, 1975.
- [96] Vakili A H, Ghasemi J, Bin Selamat M R, et al. Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193:405-415.
- [97] Vakili A H, Kaedi M, Mokheri M, et al. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application [J]. Applied Clay Science, 2018, 152:1-8.
- [98] Vakili A H, Selamat M R B, Aziz H B A, et al. Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC [J]. Geoderma, 2017, 285:270-279.
- [99] Indraratna B, Muttuvel T, Khabbaz H. Investigating erosional behaviour of chemically stabilised erodible soils[C]//Reddu. GeoCongress, New Orleans: Geosustainability and Geohazard Mitigation GSP178, 2008:670-677.
- [100] Indraratna B, Athukorala R, Vinod J S. Shear behaviour of a lignosulfonate treated silty sand [C]//12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, New Zealand: The Conference Co., Ltd., 2015:1-8.
- [101] Vinod J S, Indraratna B, Mahamud M A A. Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture [J]. Proceedings of the ICE - Ground Improvement, 2010, 163(1): 43-51.
- [102] Turkoz M, Vural P. The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2013, 20(4): 395-405.
- [103] Turkoz M, Savas H, Acaz A, et al. The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics [J]. Applied Clay Science, 2014, 101:1-9.
- [104] Goodarzi A R, Salimi M. Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag [J]. Applied Clay Science, 2015, 108:61-69.
- [105] Savas H. Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2016, 23(6): 589-598.
- [106] Savas H, Türköz M, Seyrek E, et al. Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(20):612.
- [107] Ouhadi V R, Goodarzi A R. Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum [J]. Engineering Geology, 2006, 85(1/2):91-101.
- [108] Jafari H R, Hassanlourad M, Hassanlou M R. Dispersion potential of a clay soil stabilized by alum. a case study [J]. Soils and Rocks, 2013, 36:221-228.
- [109] 万山红,李梅.分散性黏土在麦洛维工程黏土心墙坝中的应用 [J].四川水力发电, 2009, 28(S2):10-12.
- [110] 高立军,焦立国,曲金丹.大庆地区防洪工程分散性黏土坝破坏原因及整治措施 [J].黑龙江水利科技, 1998(4):33-35.
- [111] 党振虎.分散性黏土筑坝可行性探析 [J].西北水电, 2007(2):19-21.
- [112] Stocks-Fische S, Galinat J K, Bang S S. Microbiological precipitation of  $\text{CaCO}_3$  [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(11):1563-1571.
- [113] 何稼,楚剑,刘汉龙,等.微生物岩土技术的研究进展 [J].岩土工程学报, 2016, 38(4):643-653.
- [114] 李明东, Li Lin, 张振东,等.微生物矿化碳酸钙改良土体的进展、展望与工程应用技术设计 [J].土木工程学报, 2016, 49(10):80-87.
- [115] 肖建章,魏迎奇,王子文,等.微生物固化淤泥的作用机理研究 [C]//程晓辉,魏迎奇,钱春香,等.第一届全国微生物岩土与材料工程学术研讨会论文集, 2018, 10-16.
- [116] Moraveja S, Habibagahia G, Nikoosaei E, et al. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation [J]. Geoderma, 2018, 315:130-137.
- [117] 樊恒辉,刘竞,王俊杰,等.一种利用土体固化溶液加固土体的方法:201811569453.0[P].2018-12-21.

## 特邀作者简介

樊恒辉,博士,研究员,博士研究生导师,中国土木工程学会土力学及岩土工程分会青年工作委员会委员,中国土木工程学会非饱和土与特殊土专业委员会委员,国际土力学协会会员。“第八届陕西省青年优秀科技奖”获得者。国家自然科学基金评审的函评专家,《岩土工程学报》等刊物的审稿专家。

研究方向为特殊岩土工程、环境岩土工程、生物岩土工程、生土建筑材料等。主持国家自然科学基金3项,科技部“科技支撑计划”项目3项,国家重点研发计划专题1项,省部级项目3项。出版《分散性土研究》专著1部;在 Canadian Geotechnical Journal、《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》等学术刊物上发表学术论文50余篇(SCI、EI收录20余篇);获国家授权发明专利7项;参编规范2部。研究成果为指导班多、宁木特、下坂地、大石峡、南坪、文家沟、中阿坝、米林等大坝的工程设计、施工以及管理提供了可靠的科学依据。