

分散性土研究

樊恒辉 孔令伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

分散性土研究

樊恒辉 孔令伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了分散性土的研究历史及现状,阐明了分散性土的分散机理,论述了分散性土的工程特性及其改性应用措施,反映了我国岩土工程建设中分散性土理论与技术的研究成果。全书共分5章,内容包括:绪论,黏性土的分散机理,黏性土分散性鉴定试验中的若干问题,分散性土的抗渗性能,分散性土的改性试验与工程应用实例。书中附录部分对分散性土的勘察、土的分散性鉴定试验方法进行了规范化整理。

本书可供从事水利工程、土木工程的勘测、设计、施工的科研人员阅读,亦适合高等院校相关专业的教师、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

分散性土研究 / 樊恒辉, 孔令伟著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012.4
ISBN 978-7-5084-9653-5

I. ①分… II. ①樊… ②孔… III. ①粘土—研究
IV. ①P619.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第069725号

书 名	分散性土研究
作 者	樊恒辉 孔令伟 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 243千字
版 次	2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷
印 数	0001—1800册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

分散性土是近年来岩土工程界比较关注的特殊土类之一，它在低含盐量水中（或纯净水中）细颗粒之间的黏聚力大部分甚至全部丧失，呈团聚体存在的颗粒体自行分散成原级的黏土颗粒。它的抗冲蚀能力很低，容易造成堤坝管涌、路基失稳等，危害性很大。20世纪中叶，在澳大利亚首先发现分散性土，然后相继在美国、巴拿马、泰国等国家也发现了它的存在。1980年，在我国的黑龙江引嫩工程中发现分散性土，随后在新疆、山东、山西和青海等地的工程实践中曾经遇到。

国内对分散性土的研究工作开展比较晚。为了搞清分散性土作为堤坝材料可能出现的问题及防治办法，1982年，黑龙江省水利勘测设计院等单位搜集了国内外的有关研究资料，编译出版了《分散性黏土译文集》。王观平等人于1999年编写的《分散性黏土与水利工程》一书，是我国近20年研究分散性土的总结。《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》（SL 251—2000）推荐使用国外鉴定分散性土的针孔试验、双比重计试验、孔隙水可溶性阳离子试验、碎块试验等室内4种试验方法，《堤防工程地质勘察规程》（SL 188—2005）中对分散性土的勘察内容提出了要求，其他一些单位和科研工作者对分散性土的研究成果散见于国内的一些期刊，如《岩土工程学报》《岩土力学》《水力发电学报》等。

本书是作者在对多项水利水电工程大坝心墙土料分散性鉴定试验工程实例剖析的基础上，结合国家自然科学基金“土—水—电解质系统作用下土的分散机理研究”（项目批准号：50979094）的研究成果撰写而成，在工程实践及理论分析上有一定的价值。希望本书的出版，对促进我国分散性土研究有所裨益。

本书引用了西北农林科技大学岳宝蓉教授、高明霞博士、李振副研究员、李鹏副研究员等对分散性土研究的部分数据，研究生李洪良、赵高文、卢雪清、尹培杰等参与了部分研究工作，同时，书中还引用了国内外关于分散性土应用的一些工程实例和试验方法，在此一并向他们表示感谢。

由于水平有限，书中难免有纰漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

2012年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1 分散性土的发现与危害	1
2 分散性土形成的地质条件与分布规律	3
3 分散性土的鉴定方法与工程特性	4
4 分散性土的分散机理与微观结构	5
5 分散性土的应用	6
参考文献	6
第 2 章 黏性土的分散机理	10
1 土的物理化学及矿物学性质与分散机理	11
2 土—水—电解质系统的稳定性	23
3 土—水—电解质系统与土的分散性	31
4 碱化土的形成与分布	45
5 结论	48
参考文献	49
第 3 章 黏性土分散性鉴定试验中的若干问题	50
1 土的分散性综合鉴定	50
2 水对土的分散性影响	54
3 针孔下游出口处的涂层保护试验	61
4 高钠盐渍土分散性的研究	70
5 结论	73
参考文献	73
第 4 章 分散性土的抗渗性能	75
1 土样分散性鉴定结果及反滤料性质	75
2 土料自身渗透变形试验	76
3 接触流失试验	77
4 接触冲刷试验	79
5 裂缝冲刷试验	82
6 长期渗流条件下土体的渗透变形和盐分运移试验	85

7 结论	88
参考文献	88
第 5 章 分散性土的改性试验与工程应用实例	90
1 分散性土改性试验	91
2 分散性土工程应用实例	103
3 结论	114
参考文献	114
附录 A 分散性土勘察	116
附录 B 双比重计试验	118
附录 C 碎块试验	129
附录 D 针孔试验	133
附录 E 孔隙水可溶性阳离子试验	139
附录 F 交换性钠离子百分比试验	147
符号表	157
英文缩写词	158

第 1 章 绪 论

从渗透稳定角度出发, 将黏性土分为分散性土 (dispersive clay) 和非分散性土 (non-dispersive clay) 两类。分散性土在低含盐量水中 (或纯净水中) 细颗粒之间的黏聚力大部分甚至全部丧失, 呈团聚体存在的颗粒体自行分散成原级的黏土颗粒。它的抗冲蚀能力很低, 容易造成堤坝管涌、路基失稳等, 因此危害性很大。

1 分散性土的发现与危害

分散性土的发现可追溯到 20 世纪的 30 年代, 当时的土壤科学家就认识到具有自行分散性的土壤存在。J. E. Flether 和 P. H. Carroll 对美国西南部亚利桑那州的一条河谷研究表明, 自 1900 年以来河谷土地 30% 流失, 其原因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。美国俄克拉荷马州 Wister 大坝在 1949 年第一次蓄水时就发生了严重的管涌破坏, A. Casagrande 研究认为, 该坝采用的防渗土料具有高度分散性, 这是关于分散性土修筑堤坝发生破坏的首次报道。俄克拉荷马州从 1950 年起, 修建了 1500 多座防洪土坝, 其中 11 座在蓄水后就遭受破坏。另外, 该州修建的 US 59 号公路道路路基在雨水作用下冲蚀破坏严重, Jeff 研究认为其原因是路基采用了分散性土。澳大利亚 D. C. H. Cole 和 J. G. Lewis 对澳大利亚西部采用分散性土修建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, 通常与分散性土有关。F. Gutiérrez 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具有分散性。Aramsri 对泰国灌溉工程的分散性土分布进行了分析研究。

国内, 黄河水利委员会在 20 世纪 70 年代采用针孔试验研究黄河小浪底水库防渗土料的分散性, 80 年代初在黑龙江引嫩工程中由于采用了分散性土而导致输水渠道出现大量的洞穴和管涌破坏。至此, 分散性土的研究才得到重视与发展。1995 年, 海南省三亚市的岭落水库发生溃坝, 就是由于土料属于分散性土而导致的。文献检索表明, 河南的陆浑大坝、山西的上马水库、新疆的引额济克 (乌) 工程、山东的官路水库、青海的宁木特水利枢纽工程、浙江的天子岗水库、宁夏的文家沟水库等防渗土料均属于过渡性或分散性土。由此来看, 我国的分散性土分布比较广泛, 在工程实践中值得重视与研究。

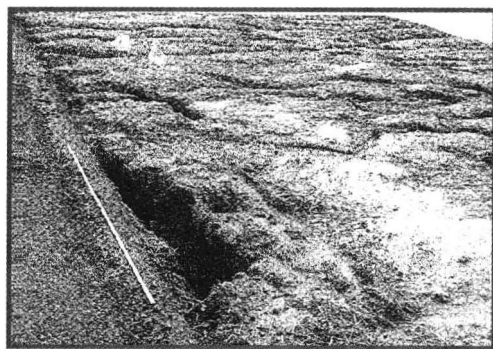
分散性土工程遭受破坏的照片见图 1-1, 示意图见图 1-2。



分散性土修筑的堤坝遭到破坏
(引自 Edgar H. Helson)



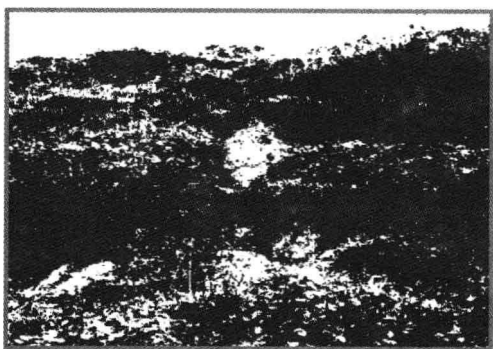
西班牙 San Juan 水库坝体破坏
(引自 F. Gutierrez)



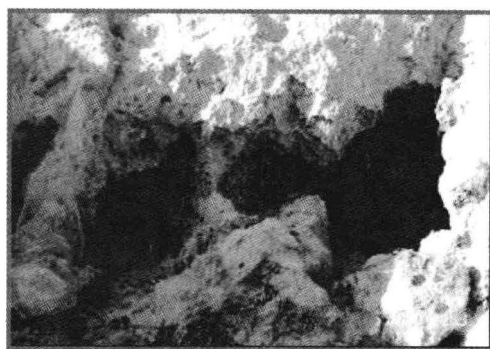
俄克拉何马州 US 59 公路道路工程破坏
(引自 Jeff Dean)



黑龙江引嫩工程 17 号坝现场特征
(引自王观平等)



海南省三亚市岭落水库下游坝坡典型冲沟
(引自刘杰)



青海宁木特土料天然特征
(引自樊恒辉)

图 1-1 分散性土工程遭受破坏的照片

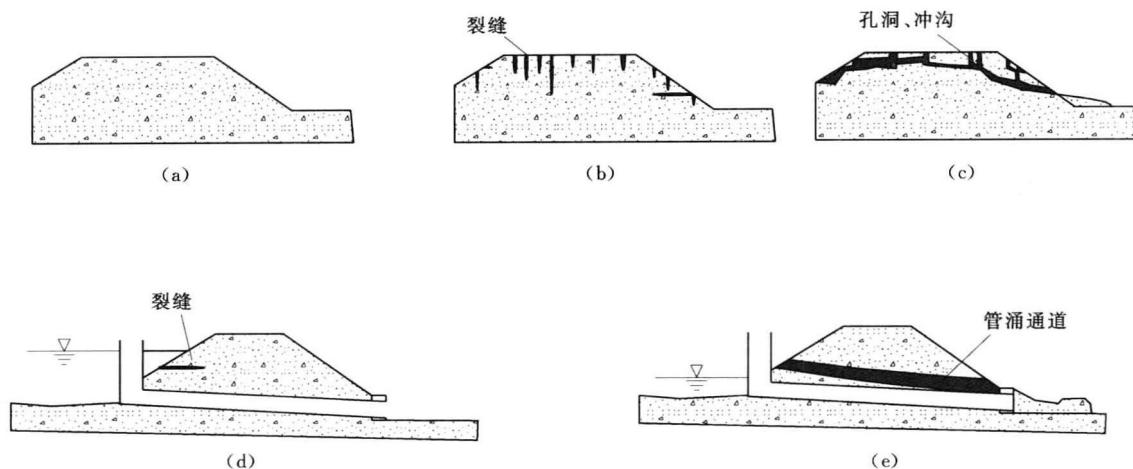


图 1-2 分散性土工程破坏示意图

(a) 堤防修建完成；(b) 堤防修建完成不久；(c) 一个雨季过后堤防状况；
(d) 土坝坝体；(e) 蓄水后坝体出现管涌

2 分散性土形成的地质条件与分布规律

土壤发生学观点认为，土壤的性质是气候、生物、地形、母质和时间等成土因素综合作用的结果，土壤发生发育的过程受到各种物理、化学和生物的作用，包括岩石的崩解，矿物质和有机质的分解、合成及物质的淋失、淀积、迁移和生物循环等。在不同的成土因素作用下，有不同的成土作用和成土过程，从而形成不同类型的土壤，分散性土也不例外。

分散性土的成因目前还不十分清楚，工程实践中发现的大部分分散性土都是洪积、坡积、湖相沉积和黄土状沉积形式的冲蚀土，但在有些地区也发现了海相沉积的黏土岩、页岩的残积土是分散性的。目前发现的分散性土沉积层都位于平坦的洪泛平原上，或有低起伏的和相当平坦的斜坡上。国外的研究表明，一般盐碱土特别是苏打盐渍土有出现分散性土的可能性，它们一般都含有碱性的孔隙水。但是，发现湿润地区也有分散性土分布，而且有些分散性土呈弱酸性。美国俄克拉荷马州交通局 Jeff 通过调查研究，绘制了该州分散性土的分布图。

我国的分散性土在不同地区均有分布，从南到北有海南的岭落水库、黑龙江的引嫩工程，从东到西有山东的官路水库、新疆的引额济克（乌）水利工程。王观平、白晓民等人通过研究松嫩平原分散土赋存的环境因素及成因，认为本区的分散土是经过长期的蒸发—累积—淋溶循环作用形成的，成土过程主要为盐化过程和碱化过程，其分布规律具有分布广、不连续的特征，与地形地貌关系密切。1994 年，黑龙江省水利水电勘测设计研究院在中部引嫩扩建工程勘测设计中对分散性土的分布、形成特点等进行了研究，绘制了松嫩平原分散性土分布图。



3 分散性土的鉴定方法与工程特性

分散性土是一种特殊性土,土颗粒在水中通过反絮凝作用过程而被侵蚀,其不能依靠传统的物理力学试验指标来鉴定,如界限含水率、颗粒级配、压实特性等。为了研究土的分散特性,美国农业部土壤保持服务实验室 G. M. Volk 发明了双比重计试验方法并提出了鉴定标准,盐渍土研究实验室的科研人员通过研究土壤的钠离子吸附比 (SAR) 和交换性钠离子百分比 (ESP) 来评价黏土的分散性。在 20 世纪 50 年代以前,有关分散性土的研究主要集中在农业土壤领域。随着水利工程的大规模建设,60 年代以后对分散性土研究有了较大的飞跃。60 年代初期,澳大利亚科研工作者通过研究,认为水库蓄水以前土体中交换性钠离子百分比与孔隙水中可溶性阳离子是处于一种平衡的状态,如果蓄水后由于渗流作用而带走土体孔隙水中的可溶性阳离子,会导致这种平衡状态的破坏,从而使土体发生管涌,据此提出了土体的交换性钠离子百分比与孔隙水中可溶性阳离子含量之间的关系图,用于评价均质土坝遭受管涌破坏的敏感性。O. G. Ingles 对澳大利亚遭受冲蚀破坏和淋蚀损坏的土坝进行了调查,研究发现分散性土与土坝的破坏有着密切的关系。

J. L. Sherard 从 1970 年以来对美国普遍存在的土坝分散性土冲蚀和淋蚀损坏进行了调查研究,根据大量的统计试验数据提出鉴定分散性土的 4 种试验方法,即双比重计试验、针孔试验、碎块试验、孔隙水可溶性阳离子试验。美国材料学会第 79 次年会召开了分散性土的专题研讨会,与会专家认为,分散性土的性质与黏土的物理化学状态和土颗粒表面的电学性质是直接相关的,常用的土工试验方法不能反映土的化学状态和土颗粒表面的电学性质,并建议鉴定分散性土应当从野外调查开始,确定是否有诸如孔洞和冲沟等异常冲蚀形式等表面迹象,然后进行双比重计试验、针孔试验、碎块试验、孔隙水可溶性阳离子试验等 4 种室内试验,并认为针孔试验是比较可靠的方法。Bell 在研究分散性土的试验中认为这些试验结论并不完全可靠,相互之间不能很好地吻合。美国材料与试验协会 (ASTM) 先后制定了双比重计试验、针孔试验、碎块试验等 3 种试验规程来鉴定黏土的分散性。此外,还有交换性钠离子百分比试验、旋转圆筒试验、 ζ -电位法、现场稀释浊度试验等方法。

国内由于分散性土研究起步较晚,虽然在有关勘察规程及研究文献中提及了分散性土,但目前没有规范规程指导试验,主要是借鉴国外的研究方法。尽管如此,我国科研工作者通过对分散性土的研究,提出了一些新的见解。秦曰章将针孔试验的 4 级水头改为 9 级水头,认为土的分散性与土的物理指标有着明显的关系,并提出用钠量比鉴定土的分散性;吴中伟提出用高分子材料护面改进针孔试验方法,以区别低凝聚性土与分散性土;樊恒辉、盛守田指出试验用水对针孔试验结果具有一定的影响,土样冲蚀用水对土样的分散性将产生显著影响,而制样用水则影响较少,应当在实验室模拟工程实际情况来研究土料在实际工况下的分散性;杨昭研究了氯盐渍土、硫酸盐盐渍土对针孔试验的影响,认为前者因其胶结作用,孔径和流量变化不大,但是后者由于膨胀作用,孔径和流量减小。

研究结果表明,分散性土按照塑性图分类,多属于中塑性,按照颗粒级配分类,至少属于轻粉质壤土,这类土渗透系数一般为 $k < 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,具有良好的防渗性能,属于



不渗透性或极低渗透性土。分散性土最明显的工程特点就是抗冲蚀的能力很低,我国北方地区的非分散性土抗冲蚀流速 v 在 100cm/s 左右,冲蚀水力坡降 i 大于 2.0,而分散性土抗纯净水冲蚀的流速很小,小于 15cm/s,冲蚀水力坡降不会大于 1.0,特别是有些缺乏中间粒径的分散性土,甚至冲蚀水力坡降小于 0.05,和非分散性土相比差异非常明显,这是分散性土的一种重要特征。此外,分散性土具有较高的收缩膨胀特性,其抗剪强度较低。

4 分散性土的分散机理与微观结构

由于分散性土遇水分散的特征是自身物理化学性质的综合体现,而且受外界因素影响,因此分散机理复杂。O. G. Ingles 和 G. D. Aitchison 认为,分散性土中的黏土矿物大部分由蒙脱石组成,并且交换性钠离子含量高;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为数甚少。J. L. Sherard 认为,分散性土的分散机理是与土颗粒表面的电化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。G. G. S. Holmgren 认为分散性土是高钠土。F. Gutiérrez 在研究圣胡安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土分散性的原因。蒋国澄等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蒙脱石类黏土矿物,且交换性阳离子中以钠离子为主;②粒间没有足以抑制膨胀和分散的胶结物,如有机质、碳酸盐、游离铁铝氧化物等;③不致促进土料絮凝的碱性介质环境及低盐浓度。刘杰认为土体分散性的条件为:①土的黏土矿物成分主要以蒙脱石为主体;②孔隙水易溶盐中钠离子占主体;③水质纯净。王观平、裘孟辛等通过对黑龙江引嫩工程的分散性土分析,认为若土中黏土矿物含有一定量的蒙脱石,并且有高含量可交换性钠就有可能是分散性土。樊恒辉前期认为土体中的钠离子和钙镁离子的含量对其分散性起着重要的作用,蒙脱石是黏土产生分散性的主要因素,但是随着研究的深入,认为土体中的钠离子和酸碱度是影响土体分散性的关键因素,蒙脱石不是土体产生分散性的必要条件。

土力学奠基人 Karl von Terzaghi 很早的时候就提出,在评价黏土类土和岩石的工程性质时,注意考虑其微观结构的必要性。土在形成过程中物理化学条件、组成特征以及应力历史等均会对其微观结构乃至工程性质造成影响。国内外对特殊土的微观结构研究主要集中在软土、红黏土、黄土、膨胀土等,对于分散性土的微观结构研究鲜见文献报道。武汉地质学院曾采用扫描电镜观察了黑龙江引嫩工程中所发现的分散性土的微观结构,认为分散性土是由矿物碎屑、凝聚体、叠片体和基质体等组成,叠片体占有一定的数量,颗粒排列没有明显的定向性,粒间联结差。有大孔隙,但单元体内及单元体间孔隙均细小,并且黏粒含量特别是胶粒含量较高。裘孟辛研究桃山水库坝料时,采用扫描电镜研究了黏土矿物的组成,但没有分析土料的微观结构。



5 分散性土的应用

世界许多地方都有分散性土分布,使用其作为堤、坝填筑土料不可避免,只要采取正确的工程处理措施,是能够保证工程的安全。目前,在化学改性分散性土方面,采用石灰、水泥、粉煤灰、硫酸铝、氯化钙、氯化铝等多种材料,但多采用石灰处理分散性土。石灰中的 Ca^{2+} 交换黏土吸附的 Na^+ ,可使分散性土变为非分散性土。由于分散性土的抗冲蚀性较低,设置反滤层是防止土体渗透破坏的一种有效措施。缪良娟认为在反滤料保护条件下分散性土具有较高的抗渗强度。郭爱国研究结果表明,设计合理的反滤层不仅对分散性土料填筑的防渗心墙具有良好的保护作用,而且即使心墙产生贯通性裂缝,在较低渗透坡降下裂缝也会自行愈合,裂缝愈合后心墙土料仍具有较高的抗渗性能。袁光国在分散性土中掺和砂砾石将其改性为宽级配土料,可降低土的分散性。洪有纬曾采用 1:25 的实体模型模拟分散性土的防治措施。此外,采用复合土工膜、非分散性土包裹在分散性土防渗体的外面,可隔离或阻止分散性土受到直接冲蚀,这也是一种行之有效的处理方法。

国内外研究进展分析表明,由于分散性土发现较晚,对其研究远远不及黄土、盐渍土、软土、膨胀土等其他特殊土的深度,虽然前人对此做了大量的工作,但现有的研究成果,尤其在土的分散机理研究方面,对于工程实践仍缺乏足够的理论指导。遇水分散是分散性土的固有特征,水是分散性土产生分散的诱发因素,而水溶液中离子种类、含量是使土颗粒产生凝聚或分散的根本因素,目前对水溶液中各种离子影响土的分散性研究较少,应深入研究分散性土化学—渗流—力学(CHM)耦合作用机理。分散性土本身具有良好的抗渗性能,但是如果防渗体存有裂缝,则容易发生渗透破坏。因此,深入了解分散性土防渗体裂缝的演变规律及其影响因素对工程实践具有一定的指导作用。分散性土的微观结构及其与渗透变形、分散性能等工程特性之间的关系研究尚属空白。建议专门开发针对分散性土的土壤固化改良剂,使其满足工程建设需求。

参考文献

- [1] 水利部长江水利委员会综合勘测局. SL 251—2000 水利水电工程天然建筑材料勘察规程 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] Charles H. McElory. The use chemical additives to control the erosive behavior of dispersed calys [C]. Engineering aspects of soil erosion, dispersive clays and loess. ASCE, New York, USA. 1987: 1-16.
- [3] R. S. Decker, L. P. Dunnigan. Development and use of the Soil Conservation Service Dispersion Test. [C]. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J. L. Sherard R. S. Decker. Eds., Amercian Society for Testing and Material, 1977: 94-109.
- [4] Petry, Thomas Merton. Identification of dispersive clay soils by a physical test [D]. Oklahoma State Unviersity, 1974.
- [5] 钱家欢. 分散性土作为坝料的一些问题 [J]. 岩土工程学报, 1981, 3 (1): 94-100.



- [6] Jeff Dean. Dispersive clay embankment erosion - a case history [A]. 54th Highway Geology Symposium [C]. Burlington, VT, USA. 2003; 306 - 320.
- [7] D. C. H Cole, J. G. Lewis. Piping Failure of Earthen Dams Built of Plaitic Materilas in Arid Climates [C]. Proceedings of the Third Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1960; 93 - 99.
- [8] F. Gutiérrez, G. Desir, M. Gutiérrez. Causes of the catastrophic failure of an earth dam built on gypsiferous alluvium and dispersive clays [J]. Environmental Geology, 2003, 43 (7): 842 - 851.
- [9] 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, Feb; 4 - 7.
- [10] 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, 3 (5): 8 - 12.
- [11] 王观平, 张来文, 阎仰中, 等. 分散性土与水利工程 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [12] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [13] 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.
- [14] 缪良娟, 陆泽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, 12 (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, 万金平, 等. “635”水利枢纽大坝心墙防渗土料分散性鉴定及改性试验研究 [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性土工程特性及改性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (7): 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] 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.
- [21] 朱祖祥. 土壤学 (下册) [M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [22] G. M. Volk. Method of determination of degree of dispersion of the clay fraction of soils [C]. Proceedings, Soil Science Society of American, Vol. 11, 1937; 561 - 565.
- [23] J. L. Sherard, L. P. Dunnigan, R. S. Decker. Some engineering problems with dispersive clays [C]. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J. L. Sherard, R. S. Decker, Eds., Amercian Society for Testing and Material, 1977; 3 - 12.
- [24] Bell, F. G., de Bruyn, I. A. Sensitive, expansive, dispersive and collapsible soils [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1997 (56): 19 - 38.
- [25] ASTM D4221 - 11, Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer [S].
- [26] ASTM D4647 - 06e1, Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test [S].
- [27] ASTM D6572 - 06, Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test [S].
- [28] 长江委长江勘测规划设计研究院. SL 188—2005 堤防工程地质勘察规程 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.



- [29] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [30] 樊恒辉, 李鹏, 巨娟丽. 论分散性黏土与鉴定方法 [J]. 水利建筑与工程学报, 2004, 2 (2): 34-38, 59.
- [31] 庄桂亮, 张晓静, 张凤臣. 分散性黏土及针孔试验 [J]. 黑龙江水专学报, 2006, 33 (4): 124-126.
- [32] 刘晓黎, 宋智香, 宫继昌, 等. 水利工程筑坝土料分散性试验方法 [J]. 人民黄河, 2007, 29 (12): 83-84.
- [33] 秦曰章. 用钠量比判别黏性土的分散性 [J]. 人民黄河, 1984, 6 (4): 28-29.
- [34] 吴中伟. 针孔试验方法的改进 [R]. 郑州: 黄河水利委员会勘测规划设计院科研所, 1989.
- [35] 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.
- [36] 樊恒辉, 高明霞, 李鹏, 等. 某大坝心墙土料分散性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (5): 615-618.
- [37] 樊恒辉, 吴普特, 李鹏, 等. 分散性土判别试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (11): 1310-1316.
- [38] 盛守田, 庞志萍, 张建平. 水质对分散性黏土冲蚀破坏的影响 [J]. 黑龙江水利科技, 1993, 21 (3): 76-77, 83.
- [39] 杨昭, 席福来, 陈华. 盐渍土与分散性针孔试验影响 [J]. 岩石力学, 2003, 24 (增): 253-254.
- [40] 刘杰, 缪良娟. 分散性黏性土的抗渗特性 [J]. 岩土工程学报, 1987, 9 (2): 90-97.
- [41] O. G. Ingles, G. D. Aitchison. Soil - water disequilibrium as cause of subsidence in natural soils and earth embankments [C]. Proceedings of the ToKyo Symposium on Land Subsidence, Vol 2, 1969: 342-353.
- [42] J. L. Sherard, R. S. Decker, R. L. Ryken. 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.
- [43] G. G. S. Holmgren, C. P. Flanagan. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test [C]. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J. L. Sherard R. S. Decker. Eds., American Society for Testing and Material, 1977: 218-239.
- [44] 蒋国澄. 黏性土的结构稳定性及其某些特殊性土的性状 [J]. 岩土工程学报, 1986, 8 (4): 70-75.
- [45] 王观平. 黏土矿物与分散性黏土 [J]. 黑龙江水专学报, 1994, 21 (3): 21-25.
- [46] 裘孟辛. 钠蒙脱石对土的稳定性影响 [A]. 水利水电科学研究院科学研究论文集第20集 (岩土工程), 1984: 120-126.
- [47] 孔令伟, 郭爱国, 吕海波, 等. 典型红黏土的基本特性与微观结构特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (A01): 973-977.
- [48] 高国瑞. 近代土质学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.
- [49] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [50] 李生林, 施斌, 杜延军. 中国膨胀土工程地质研究膨胀土 [J]. 自然杂志, 1997, 19 (2): 82-86.
- [51] 王永焱, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [52] 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 [A]. 水利水电科学研究院科学研究论文集第20集 (岩土工程), 1984: 127-134.
- [53] 李兴国, 许仲生. 分散性土的试验鉴别和改良 [J]. 岩土工程学报, 1989, 11 (1): 62-66.



- [54] S. Salahuddin Shah, H. Omar. A case study - Stabilization of dispersive soil using lime [C]. *Problematic Soils*; proceeding Vol. 1, 1998; 739 - 742.
- [55] J. T. Phillips. Case Histories of Repairs and Designs for Dams Built with Dispersive Clay [C]. *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, ASTM STP 623, J. L. Sherard, R. S. Decker, Eds., American Society for Testing and Material, 1977; 330 - 340.
- [56] 杨昭. 关于分散性土料改性试验的探讨 [J]. *大坝观测与土工测试*, 1999, 23 (5): 36 - 38.
- [57] 徐昭巍, 张滨. 石灰改良分散土冻融性能的研究 [J]. *水利科技与经济*, 2007, 13 (7): 496 - 497.
- [58] W. sungwornpatansakul, P. voottitpruex, C. modmoltin. Improvement of dispersive soil embankment using lime, cement, and flyash [C]. Leung, eds. 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering [A]. World Scientific Publishing, 2003; 549 - 552.
- [59] McElory, C. H. Using hydrated lime to control erosion of dispersive clays [C]. *Lime for Environmental Uses*, ASTM STP 931, K. A. Gutschick. Ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987; 100 - 114.
- [60] V. R. Ouhadi, A. R. Goodarzi. Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum. *Engineering Geology*, 2006, (85): 91 - 101.
- [61] L. Ryker. Norman. Alum treatment of dispersive clays in Oklahoma [C]. *Engineering aspects of soil erosion, dispersive clays and loess*. ASCE, New York, USA. 1987; 1 - 16.
- [62] 郭爱国, 侍克斌. 分散性黏土裂缝自愈与反滤保护试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21 (12): 1886 - 1890.
- [63] 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.
- [64] 洪有伟, 盛守田. 黑龙江省西部地区分散性黏土工程特性及处理措施 [J]. *岩土工程学报*, 1984, 6 (6): 42 - 52.
- [65] 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, 25 (1): 119 - 120.
- [66] 李春红, 王宏伟, 安清平. 中引八干渠工程分散性黏土及流沙处理 [J]. *黑龙江水利科技*, 1996, 24 (3): 76 - 78.
- [67] 孙晓明. 分散性黏土在水利工程中的应用 [J]. *黑龙江水专学报*, 1993, 20 (3): 45 - 48.
- [68] 王观平. 黑龙江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, 23 (3): 18 - 22.
- [69] 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.
- [70] 党振虎. 分散性黏土筑坝可行性探析 [J]. *西北水电*, 2007 (2): 19 - 21.
- [71] 樊恒辉. 我国北方地区分散性土的分散机理及其应用技术研究 [R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [72] FAN Henghui, KONG Lingwei. Study on the dispersivity of the dam core soil of the Ningmute Reservoir on the Yellow River [A]. In: D. A. Cameron, W. Kaggwa. *Proceedings of the 3rd International Conference on Problematic Soils (Adelaide, Australia)* [C]. Singapore: CI-Premier Pte Ltd, 2010; 89 - 96.
- [73] 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及其改性试验 [J]. *岩土力学*, 2010, 31 (1): 193 - 198.
- [74] 田堪良, 张慧莉, 樊恒辉. 分散性土鉴别方法及工程防治措施研究综述 [J]. *水利发电学报*, 2010, 2 (29): 204 - 209.

第2章 黏性土的分散机理

分散性土被水冲蚀破坏是一个复杂的物理化学和力学过程，其破坏具有快速、隐蔽的特点，具有潜在危险性，常造成堤基、堤身和建筑物地基失稳，日趋受到工程界关注。在黏性土的分散机理研究方面，各国学者根据本国的工程实践，对分散性土的分散机理提出了不同的看法。以 J. L. Sherard 为代表的美国学者认为：分散性土的分散机理是与土颗粒表面的电化学性质有直接关系；土中的钠离子是产生分散的主要原因；黏土矿物中通常含有相当量的蒙脱石；与孔隙水中的其他阳离子相比，钠离子的数量是决定土产生分散性的重要因素。

澳大利亚学者 O. G. Ingles 和 G. D. Aitchison 等认为：分散性土中的黏粒部分大部分由蒙脱石所组成，并且土体中交换性钠离子百分比含量很高；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性土产生管涌的一个主要因素；钠离子的作用使黏土颗粒周围的双电层厚度增加，从而减小颗粒之间的吸引力，使颗粒易于从土体析出；如果土中的黏土颗粒主要由蒙脱石组成，则一般具有较高的交换性钠离子百分比和管涌潜力。某些含伊利石的土样也具有高度分散性。在以高岭石为主组成的黏土中，具有高的交换性钠离子百分比和高分散性的为数甚少。

G. G. S Holmgren 从成因上解释了分散性土的形成，他也认为分散性土是高钠土。即使孔隙水溶液中的初始钠离子浓度很低，但是由于土体水分蒸发，溶解在水溶液中的钙离子和镁离子脱溶为不溶性的碳酸盐，使得溶液中的钠离子相对浓度变得非常高。这样，土体中的孔隙水溶液改变了交换平衡，促使钠转移到土壤黏土颗粒表面。后来，淋溶作用冲走了可溶性盐，但是可交换钠仍保留在土壤中。由各种形式的蒸发—累积—淋溶循环，形成了高钠土，即分散性土。

中国学者王观平等主要是从黏土矿物的角度进行了分析，认为黏性土产生分散性的原因主要是土体黏土矿物中含有相当量的 2:1 型结构，具有强烈膨胀性的蒙脱石—皂石类矿物。刘杰等认为土体的分散机理主要有 3 个方面：①土的黏土矿物成分主要以蒙脱石为主体；②孔隙水易溶盐中钠离子占主体；③水质纯净。其中，前两个方面是从土体本身的角度来说明分散性的，第 3 个方面是从外因来说明的。魏迎奇等通过分析总结中国水利水电科学研究院在过去 20 多年对国内外 10 个工程 34 个黏性土样的分散性鉴定试验结果，认为土的分散性与其颗粒组成、土颗粒相对密度（比重）和液塑限没有直接关系，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。

综上所述，分散性土从土体自身的角度来考虑，其分散机理主要有 3 个方面，即：①土体中含有一定量的蒙脱石；②孔隙水溶液中钠离子占主体；③具有较强的碱性。但



是, 实践证明, 即使不易分散的伊利石在一定的条件下也具有分散性; 有些高钠土是非分散性土, 但低钠土处于分散状态; 室内试验鉴定是分散性土的土料在水利工程中却没有发现冲蚀迹象。因此, 黏性土遇水分散的机理是复杂的。本章主要基于土壤胶体的双电层理论和 DLVO 理论, 研究在不同介质环境条件下土的分散性变化, 从矿物成分、pH 值、阳离子种类和浓度及微观结构来分析影响土体分散性的内在因素, 并以工程实例加以说明。

1 土的物理化学及矿物学性质与分散机理

虽然现有的研究表明, 土的分散性与物理力学指标之间的关系不是很密切, 而是与土体的化学性质、矿物成分之间有关系。但是, 土体的物理、力学、化学之间有着一种天然的联系, 相互之间彼此影响, 只是影响强弱而已。本节通过对收集到的分散性土试验资料进行整理分析, 试图从土体的物理化学及矿物学等基本性质方面寻求表征土体分散性的指标及其范围, 以求揭示黏性土的分散机理。

1.1 土样的选取与试验资料的整理

考虑到资料的完整性与数据的可靠性, 选取青海宁木特水电站 9 组土样、青海班多水电站 17 组土样、宁夏文家沟水电站 6 组土样、新疆西郊三坪水库 8 组土样、西安黑河金盆水利枢纽工程 4 组土样、宁夏南坪水库 4 组土样等 6 个工程的 48 组土样的试验数据进行整理分析。试验结果见表 2-1~表 2-5。

土样的物理性质包括: 颗粒相对密度 (比重)、颗粒级配以及界限含水率等。化学性质包括: 易溶盐总量及其分量、中溶盐、难溶盐、有机质、pH 值、交换性钠离子百分比 (ESP)、钠离子百分比 (PS) 等。采用 X 射线衍射方法测定土样的黏土矿物含量。采用双比重计试验、碎块试验、针孔试验、孔隙水可溶性阳离子试验、交换性钠离子百分比试验等 5 种试验方法, 对土样的分散性进行鉴定。

表 2-1 土样的物理性质

工程名称	土样编号	颗粒相对密度 G_s	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	颗粒组成 (%)			土样分类
						砂粒	粉粒	黏粒	按 SL 237—1999
						2~ 0.075mm	0.075~ 0.005mm	<0.005mm	按塑性图
青海宁木特水电站	1	2.72	27.9	16.2	11.7	20.0	66.0	14.0	低液限黏土 (CL)
	2	2.66	34.8	21.4	13.4	14.0	58.5	27.5	低液限黏土 (CL)
	3	2.71	29.4	12.8	16.6	29.0	59.0	12.0	低液限黏土 (CL)
	4	2.64	38.0	24.2	13.8	9.0	64.0	27.0	低液限黏土 (CL)
	5	2.66	33.5	20.8	12.7	12.0	58.0	30.0	低液限黏土 (CL)
	6	2.70	29.0	15.5	13.5	23.0	57.0	20.0	低液限黏土 (CL)
	7	2.71	27.0	16.1	10.9	21.0	63.0	16.0	低液限黏土 (CL)
	8	2.70	24.3	15.6	8.7	26.0	56.0	18.0	低液限黏土 (CL)
	9	2.69	24.8	14.0	10.8	15.0	64.5	20.5	低液限黏土 (CL)