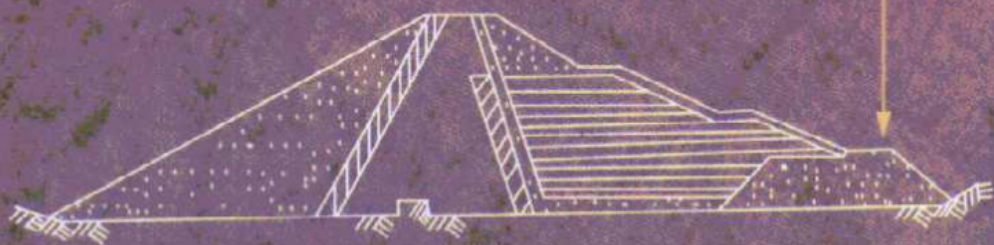




分散性粘土 与 水利工程

王观平 张来文 阎仰中 柯 荣 编著



43
2



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

封面设计 邓红
中国水利水电出版社美术工作室

分散性粘土与水利工程

ISBN 7-5084-0170-0



ISBN 7-5084-0170-0/TV · 43

定价: 15.00元

TV443

W32



分散性粘土与水利工程

王观平 张来文 阎仰中 柯荣 编著

水利部科技专著出版基金资助项目



A0919035



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是根据《黑龙江省南部引嫩工程分散性粘土试验研究》和《黑龙江省南部引嫩工程分散性粘土的研究与处理措施》等论文及大量的试验资料编写的。全书共分九部分,主要包括分散性粘土简介,分散性粘土的发现经过,分散性粘土的性质和对水利工程的危害,分散性粘土的野外识别和勘测工作,分散性粘土的试验,南部引嫩工程试验资料汇编,粘土矿物介绍,分散性粘土的分散机理,分散性粘土的工程处理。最后,还附有国外对一些分散性粘土坝的处理情况。

本书适用于从事土木、水利专业的勘测、设计、施工人员和科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

分散性粘土与水利工程/王观平等编著. —北京:中国水利水电出版社, 1999. 10

ISBN 7-5084-0170-0

I. 分… II. 王… III. 水利工程-粘土, 分散性-处理
N. TV541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 62622 号

书 名	分散性粘土与水利工程
作 者	王观平 张来文 阎仰中 柯荣 编著
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	850×1168 毫米 32 开本 5 印张 98 千字
版 次	1999 年 11 月第一版 1999 年 11 月北京第一次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	15.00 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

1980年，在黑龙江省南部引嫩工程17号坝上发现了大量的被雨水淋蚀的洞穴，当时17号坝尚未蓄水，在2300m长的坝上竟出现了300多个雨水淋蚀的洞穴，震惊之余我们对分散性粘土开展了试验研究工作。从1980年到1987年，除黑龙江省水利水电勘测设计研究院试验室外，还委托中国水利水电科学研究院土工所、中国科学院南京土壤研究所、武汉地质学院等8个科学研究和试验单位，进行了包括对分散性粘土四项室内试验、X光衍射分析、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、化学元素全量分析等10多项试验。不仅圆满地解决了工程处理难题，并在分散性粘土分散机理的研究上取得了突破性进展。该试验研究课题获得1987年度黑龙江省科学技术进步二等奖。当时河海大学钱家欢教授的评语是：“黑龙江水利勘测设计院为中国研究分散性粘土做了卓有成效的首创性的工作，并成功地应用于实践。本人估计在中国分散性土的分布，华东、华南某些地带，可能分布更为广泛，所以这份工作的成果，不但对东北，而将来对南方，更为有用。也可以这样说，本工作为全中国水利建设，作出了较重要的贡献。”广西大学柯尊敬教授的评语是：“本成果在调查研究和广泛收集资料的基础上，明确了分散性土的野外识别和室内试验的方法；在理清了分散性土基本性质的基础上，论证了分散性土筑坝的

可能性，得出了分散性土可以筑坝的结论，并提出了相应的经济合理、切实可行的工程处理措施；同时在深入研究分散性土物质成分和微观结构的基础上，对分散性土的分散机理提出了全面的见解。因此，本成果不仅具有重大的实际意义，而且还具有理论意义。”

本书是在黑龙江省南部引嫩工程分散性粘土试验研究成果的基础上，吸收黑龙江省近年来各有关工程对分散性粘土试验研究的成果和国内外有关资料编写而成。对分散性粘土的性质及其对水利工程的危害、勘测、试验、分散机理、工程处理措施等都作了全面的叙述，在工程实用上和理论上都具有一定的价值。本书在编写过程中，傅宁、徐青同志也做了一定量的工作，在此表示感谢。

本书为水利部科技专著出版基金资助项目，在此，我们全体编著者对水利部科技专著出版基金委员会表示深深的感谢。另对本书的出版曾给予大力支持的同志深表谢意。

由于水平所限，书中疏漏和不当之处，恳请批评指正。

编 者

一九九九年九月

一、分散性粘土简介

分散性粘土在世界各地都有发现,在某些地区分散性粘土很普遍。除了澳大利亚、美国普遍发现有分散性粘土以外,以色列、加纳、委内瑞拉、墨西哥、巴西、南非、泰国和越南,都已经发现有许多分散性粘土沉积层。我国国内分散性粘土也很普遍,在工程上遇到的有:黑龙江、新疆、江苏等省(区);在地质勘探上发现有分散性粘土的有:湖北、浙江、广西、辽宁、山东、河南、吉林等省(区)。

分散性粘土在水利工程上产生破坏,国外是本世纪50年代首先在澳大利亚发现的。澳大利亚在60年代开始调查研究;60年代美国发现分散性粘土对工程产生的破坏,于1971~1972年进行广泛调查和试验研究。国内是黑龙江省首先发现分散性粘土,并进行试验研究的。70年代在兴建北部引嫩、繁荣灌区等工程时就遇到分散性粘土对工程产生破坏,但当时不知道是什么原因,直到1980年南部引嫩工程中出现严重的雨水冲蚀破坏,才引起重视,进行调查和试验研究。经过6年多的试验研究工作,已搞清了分散性粘土的性质,掌握了鉴别分散性粘土的试验方法,提出了黑龙江省南部引嫩等工程对分散性粘土的处理措施。

分散性粘土在塑性图上的A线以上,介于黄土与膨胀土之间,有小部分与黄土重叠(图3-1)。分散性粘土具有易被水冲蚀的特性,容易被雨水淋蚀产生冲蚀孔洞

和被渗流水冲蚀出现管涌破坏。分散性粘土的分散是由土和水两方面因素决定的，在盐浓度低的水中，分散性粘土迅速分散，造成工程破坏，随着水中盐浓度的增加，可以逐渐减小分散程度，盐浓度达到一定程度分散性土就不再分散。分散性粘土对水利工程的破坏是严重的、迅速的，但是可以防治的。只要鉴别出来以后，采取合适的措施，用分散性粘土修筑挡水工程是安全可行的。

只要了解分散性粘土，在野外即可被识别。分散性粘土的勘探工作，除地质、地理地形外，还要注意土壤类别和地下水的各种离子含量等。鉴别分散性粘土的试验方法是逐步完善的，60年代在澳大利亚主要是用交换性钠百分比（ESP）或者钠吸附比（SAR）和碎块试验，70年代初在美国增加了分散度试验和孔隙水可溶盐试验。到70年代中期，确立了美国水土保持局的4个室内试验：针孔试验、孔隙水可溶盐试验、双比重计试验和碎块试验。用这4个试验就能准确地鉴别出分散性粘土。

根据大量的试验资料，在国内外学者研究的基础上，黑龙江省南部引嫩工程分散性粘土试验研究工作。经过几年的探索，对分散性粘土的分散机理提出了比较完整的见解。只有搞清分散机理，才能对分散性粘土有全面的认识，这是在工程上对分散性粘土的防治工作的可靠基础。

水利工程中对分散性粘土的处理措施有：①用防水材料把分散性粘土保护起来。②改造库水。③改造坝体土质在防渗体后设置有效的反滤等方法。澳大利亚一些为城市供水的水库，采用在库内投放生石膏等改造库水

的措施。国外常用的处理措施是用石灰改造坝体土质,80年代编制的美国垦务局设计标准 No. 13《填筑坝》(草案)中就推荐这个处理措施。黑龙江省南部引嫩工程 17 号坝采用石灰改造坝体土质,结合坝后设置有效反滤的方法;黑龙江省双阳河水库土坝采用土工防渗膜包裹的方法;黑龙江省中部引嫩工程渠堤,根据各段分散性粘土的分散程度和填方的高度,分别采取石灰土加中间防渗膜、单独用石灰土和单独用中间防渗膜等方法处理。南部引嫩工程处理后已经运用 10 多年,其他两项工程也都经过运用,情况均良好。

二、分散性粘土的发现

(一) 国内分散性粘土的发现

在松辽盆地普遍存在着分散性粘土，在以往工程上也碰到了，如北部引嫩工程乌北段总干渠渠堤的溃决、齐齐哈尔市江东灌区 6 支渠渠堤的管涌破坏和富裕县繁荣灌区引渠的破坏等等都是分散性粘土在作怪，因当时还没有认识到它，所以在处理上走了不少弯路。

南部引嫩工程 1978 年开始施工，1979 年 17 号坝竟出现雨水淋蚀的洞穴 10 多处，因 17 号坝平均坝高只有 5m，所以当时没有引起应有的重视。1980 年淋蚀洞穴已发展到 300 多处，才感到问题的严重性。鉴此，黑龙江省水利水电勘测设计研究院组织一些老同志于 1980 年 9 月进行实地考察。对 17 号坝进行考查，发现雨水从干缩裂缝、冻缩裂缝和施工各工段的接头处等薄弱环节，由坝顶或坝坡渗入坝体，再从坝坡脚流出，形成一个个空洞。一般洞深 2~3m，洞大到能钻进一个人，如图 2-1、图 2-2、图 2-3。

调查还发现除 17 号坝外，其他各坝也存在着程度不

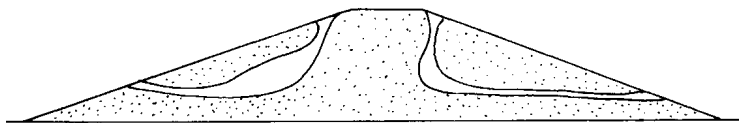


图 2-1 南引 17 号坝淋蚀洞示意图



图 2-2 17 号坝顶淋蚀洞穴

同的雨水淋蚀洞穴，当时有人还认为是施工质量问题，直至看到总干渠马道的原地面（图 2-4、图 2-5）隔 3~5m 就有一个淋蚀洞穴、数量不比土坝少、有些洞穴比土坝上的还要大，这才意识到可能是土质有问题。于是想到《土石坝工程》^[1]中提到的美国威斯特坝下游坡特殊形式的雨

水冲蚀洞和书中介绍的分散性粘土，根据现场调查的情况，初步认定土质为分散性粘土。

《土石坝工程》中介绍了两种区分分散性粘土的方法。一是“碎屑试验”（通常叫“碎块试验”）；一是交换性钠百分比试验，即 *ESP* (Exchangeable Sodium Percentage) 试验。碎屑试验的判断标准不很清楚，而 *ESP* 试验则比较明确，“具有 *ESP* 为 7 至 10 的土是中等分散性的，当库水的可溶盐含量较低时，管涌将伴随而来。*ESP* 超过 15 则具有严重的管涌可能性。”于是取了一些土样做 *ESP* 试验，结果 $ESP > 15$ ，属严



图 2-3 17 号坝洞穴出口

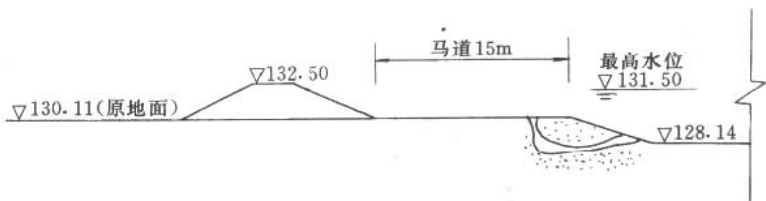


图 2-4 总干渠上马道淋蚀洞示意图



图 2-5 干渠上马道溶蚀洞

重分散性。当时国内这方面资料非常少,到 1976 年《广西科技译文》上有一篇《分散性粘土坝中的管涌》^[2],对分散性粘土叙述的比较详细,但试验方法还是交换性钠百分比。到 1979 年 11 期《黄委科技情报》刊登的《针孔试验,粘土分散性试验》^[3],提到了针孔试验,但还不是对分散性粘土试验

的全面介绍。这时,华东水利学院钱家欢教授给了我们很大支持,把他发表在《岩土工程学报》上的《分散性粘土作为坝料的一些问题》^[4]一文寄给我们,文中详细地介绍了美国水土保持局(SCS)鉴别分散性粘土的 4 个室内基本试验。1981 年又在中国科学院情报研究所找到《美国材料试验学会(ASTM)第 79 次年会(1976)关于分散性粘性土管涌冲蚀问题论文集》一书,共收集有关资料 50 多篇约 70 余万字,为我们研究分散性粘土提供了宝贵的资料。

根据收集到的资料,在黑龙江省水利水电勘测设计研究院试验室筹备了美国水土保持局建议的分散性粘土的 4 个室内基本试验,即碎块试验、双比重计试验、孔隙水可溶盐试验和针孔试验,并做了大量的试验。我们委托黄委设计院试验室做针孔试验,委托哈尔滨建筑工程学院在铸石实验室做粘土矿物鉴定,请中国科学院地质研究所工程地质研究室等单位做一些有关试验,并与中国水利水电科学研究院岩土所合作做 4 个室内基本试验和土样化学试验等。大量的试验结果表明,黑龙江省南部引嫩工程的分散性粘土是很典型的,各种试验的结果都是一致的。

在以后的进一步研究中,又请武汉地质学院做化学元素全量分析、压出液试验、吸蓝量试验、离子交换量、可溶盐、比表面积、红外光谱、X 光衍射分析、扫描电子显微镜和透射电子显微镜等多种试验;请中国科学院南京土壤研究所进一步做 X 光衍射分析和交换性阳离子试验。

1980 年,在黑龙江省南部引嫩工程中发现分散性粘土,当时也未能为大家所接受。直到我们做了几年工作以后,才逐渐为工程界所认识。1983 年 10 月在全国水利工程渗流学术讨论会上,水利水电科学研究院刘杰同志说:“粘性土是指塑性指数大于 7,粘粒含量大于 10% 的土。有分散性和非分散性两大类”。从此,分散性粘土在我国得到了普遍的承认。

(二) 国外发现分散性粘土的概况

在工程实践中,普遍地认识到分散性粘土是最近的

事。从 60 年代开始，澳大利亚首先发现某些粘土在水中有不同程度的分散性，并认为这是许多土坝所以失事的一个重要原因。这个结论引起了其他国家的重视。美国在 70 年代紧跟澳大利亚之后，从野外调查、室内试验以及补救措施等各方面来研究分散性粘土料筑坝的问题，取得良好成果。

澳大利亚的周边都分布有分散性粘土，60 年代初期，澳大利亚的土工科技人员对失事的中小型土坝作了一系列的调查研究，发现某些粘性土料所以易被水冲蚀，有其内在的原因。《土石坝工程》^[1]一书中有介绍：“艾奇逊和英格尔斯以及艾奇逊、伍德和拉林斯分别于 1965 年与 1966 年报告了澳大利亚各地许多低坝的研究，坝高一般低于 6m。这些坝一般都是均质土坝，设有滤层和排水，施工时不作含水量控制，仅由运输机械的往回来压实。由于普遍的气候条件，坝体建筑时的含水量均较最优含水量少，在 3000 多个这种结构的土坝中，大约 8% 由于快速发展的渗漏冲蚀而导致失败。研究了大约 100 个失事事例，做了土壤化学以及土的工程性质的试验。研究人员得出结论：在失事的可能性和土中存在的高成分可交换的钠离子中间有高度的相关性，特别是在库水含可溶盐较低的情况下。以色列对 10 座低坝的研究也报导了同样的结果，其中有 5 座坝由于管涌而失事。从这些研究中得到的一些主要结论和观点如下。

(1) 粘土的管涌是由一个叫做“分散”（或叫“反絮凝”）的过程所引起的。当个别粘土微粒间的排斥力（电表面力）超过其吸引力时，这种过程就会发生。所以当

粘土体与水接触时，个别的粘土微粒就逐渐地被分离而处于悬浮状态。如果水是流动的，被分离出来的个别粘土微粒将被带走。在含有粘土细粒不同的土中，倾向于分散管涌的趋势有很大的差异。

(2) 对分散管涌的趋势取决于粘土的一些性质，包括可交换的钠成分 (ESP ，一般称 ESP 为交换性钠百分比)、 pH 值、土的种类以及水中可溶盐含量。钠的作用是增加双电层的厚度和增加微粒间的排斥力，从而使个别的粘土微粒更易于从整体中分离出来。

(3) 当一个集中渗流通过高 ESP 的坝体时，可能发生：①如果渗流的流速足够低，流道四周的粘土将膨胀，并且逐渐地堵塞住漏洞。②如果开始的流速就足够快，被分离的粘土微粒被带走，流道的扩大速率大于膨胀所起的堵塞作用，则坝就会因管涌而失事。

(4) 最初的渗漏可能由于不恰当的碾压造成在粘土坝体内的通道（土块间的大孔隙），或者通过干燥引起的裂缝。

(5) 具有 ESP 为 7 至 10 的土是中等分散性的，当库水的可溶盐含量较低时，管涌将伴随而来。 ESP 超过 15 的土具有严重的管涌可能性。

(6) 管涌可能性与对粘土一般的指数特性试验（阿泰堡界限、颗粒大小、收缩）结果之间没有什么关系。具有高含量可交换钠的土，其范围可自无粘性泥沙（ ML ）至高塑性的粘土（ CH ）（按 GB J145—90《土的分类标准》， ML 称为低液限粉土， CH 称为高液限粘土。）

(7) 土中粘土部分大部由蒙脱土所组成，一般可以发现

它具有高 *ESP* 值和管涌可能性。有些伊利土具有高的 *ESP* 值。高 *ESP* 值的高岭土是少有的。此外,高岭土比蒙脱土具有较大的分散性颗粒的尺寸,而需要较大的渗漏通道,管涌才能开始,所以高岭土将遇到较少的困难。

(8) 经过分散性试验,即碎屑试验,发现分散性粘土与管涌失事的发生密切相关。简单地说,这个试验包括把在空气中干燥好的土屑放到 1mmol/L 的氢氧化钠溶液中。如果在 1 小时以后在土屑周围有一团粘土的胶状雾体,则这个土便认为是可分散的。在这种试验中分散性的土,用来修筑农用坝,如不经压实、不进行含水量控制是不安全的。在 26 座失事坝中的 25 座,拉林斯发现在这种试验中土料都表现了分散的特性。

艾奇逊和伍德在 1965 年给出一份有关 20 座坝(其中 14 座失事)的研究报告。这是他们从澳大利亚的 4 个州里选出来的,以代表不同的天气和土的条件。卡西夫和亨金 1967 年对以色列的 10 座坝(其中 5 座失事)作了类似的研究。他们发现库内水的盐浓度对坝是否失事有影响,同为钠吸附比(*SAR*)较高的土筑成的坝,在盐浓度高的库水条件下不失事,在盐浓度低的库水条件下就会失事。他举出其中的一座坝,水库最初用较富于溶解盐的地下水充满,此坝挡水数年仅仅有少量渗漏,而后来水库又用低溶盐水充满,3 天内坝即失事。

这里所叙述的研究是根据小型农用坝的运行,它们一般是用拖拉机和刮土机建造的,既没有碾压机,也没有工程控制。在他们初期的论文中,澳大利亚的研究者推测,甚至当土中有高的 *ESP* 和库水有低的溶盐时,在

施工良好的坝中，也不致在粘土心墙里发生管涌。

但是，以后许多澳大利亚工程师已经做出结论：甚至在有碾压机和水量、容重控制的坝内，高度分散性粘土的心墙仍可以发生管涌。英格尔斯等人 1968 年和 1969 年叙述了弗拉格斯塔夫沟坝的失事，横断面见图 2-6 它是为塔斯马尼亚的霍巴特城市区给水水库而建造的，库容 22.7 万 m^3 、坝高 16.76m、坝长 210.31m，是一座建于岩基的心墙堆石坝。心墙主要是蒙脱土，在上下游有滤层。组成心墙下部的粘土有下列性质：粘土心墙的上部取自另一取土坑，其液限为 75，塑性指数为 60；在心墙下部， ESP 为 17，而在上部 ESP 为 10。心墙显然是施工良好，其含水量接近 AASHO 标准的最优含水量。

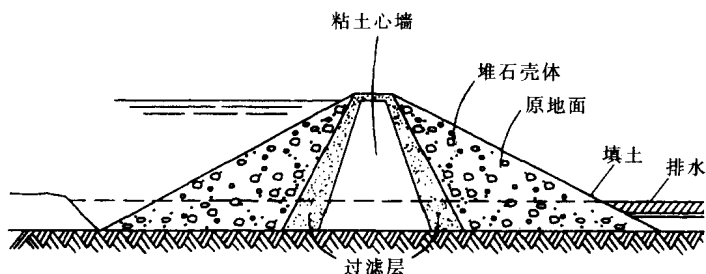


图 2-6 弗拉格斯塔夫沟坝横断面图

液限：40；塑性指数：25；颗粒尺寸：小于某尺寸的平均百分比（%）；2mm：90；200号筛：65；0.002mm：30

这座坝所蓄的水取自 32km 以外，有低的溶盐含量（不使当地的径流流入），水中的溶盐总量大约为 $1.0 \frac{1}{n} \text{mmol/L}$ (n 为元素的化合价)。1963 年 7 月，初次蓄水后 3 个星期，在下游坝趾出现了渗流量很大的浑浊漏水。水库的蓄水