

南京水利科学研究院出版基金资助出版

SHALUANSHI DIJI DAXING QUDAO DE
SHENLIU YU KANGFU

砂卵石地基大型渠道的 渗流与抗浮

谢兴华 赵廷华 张文峰 杨华军 编著



黄河水利出版社

南京水利科学研究院出版基金资助出版

砂卵石地基大型渠道的渗流与抗浮

谢兴华 赵廷华 张文峰 杨华军 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

图书在版编目(CIP)数据

砂卵石地基大型渠道的渗流与抗浮/谢兴华等编著. —郑州:
黄河水利出版社, 2010. 7

ISBN 978 - 7 - 80734 - 882 - 5

I. ①砂… II. ①谢… III. ①南水北调 - 水利工程 -
渠道 - 砂土 - 地基处理 - 研究②南水北调 - 水利工程 - 渠
道 - 卵石 - 地基处理 - 研究 IV. ①TV68②TV223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 161182 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsicbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9.5

字数:220 千字

版次:2010 年 7 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2010 年 7 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

前 言

宽级配砂卵石颗粒组成复杂,颗粒粒径范围较大。大颗粒有可能构成堆积结构,细颗粒能够在水流作用下在大颗粒孔隙中自由移动,而不破坏堆积体整体稳定性(不发生渗透破坏)。因此,其渗透特性具有与一般非黏性土不同的特征。目前的工程设计计算方法并未考虑这一因素,仍然采用传统的渗透破坏理论,认为细颗粒开始移动时(渗透变形)的坡降为渗透破坏的临界坡降,并以此设防,往往会造成浪费,有的情况下难以满足规范要求。本书基于对南水北调中线一期工程黄北段的特殊地基渗透特性研究,以及各种洪水工况的渗流场模拟计算研究,试图在理论上探索能够客观描述砂卵石渗透特性的手段和方法,提出方便设计人员使用的简便易行的计算方法。

南水北调中线工程规模巨大,总干渠断面大,黄北段遇到特殊的地质条件,使得渠道设计既要防渗,又要考虑抗浮稳定问题,而且,各渠段地质、水文条件变化较大,使得设计工况复杂。为此,河南省水利勘测设计研究与南京水利科学研究院合作开展专题研究,本书是在此专题研究成果的基础上提炼总结而成的。本书对山前冲洪积砂卵石层渗透特性的研究,为该段总干渠底板抗浮稳定设计提供了较好的技术支撑。本书研究成果的出版,也将为类似工程设计提供重要参考。

本书内容还包含了参与专题研究的谈叶飞、冯瑞军的部分工作成果,并得到了宁博、耿妍琼等同事的支持。本书出版得到了黄河水利出版社岳德军编审等的积极帮助,出版社同仁的编辑工作使本书增色不少。本书由南京水利科学研究院出版基金资助出版,在此表示感谢。

由于作者水平所限,书中定有谬误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2010年7月

目 录

前 言

第1章 砂卵石渗透特性研究进展	(1)
1.1 砂土渗透变形破坏形式及判别方法研究	(1)
1.2 砂砾石土承载骨架研究	(4)
1.3 非黏性土渗透系数计算方法研究	(5)
1.4 非黏性土临界坡降研究	(7)
1.5 渗透变形(破坏)试验方法研究	(8)
1.6 渠道防渗研究	(9)
1.7 渠道抗浮研究	(11)
第2章 粗颗粒砂卵石地基的渗流特性	(13)
2.1 河床砂卵石的颗粒组成特性	(13)
2.2 砂卵石的渗透变形与渗透破坏	(18)
2.3 影响渠道底板扬压力的因素	(21)
2.4 小 结	(25)
第3章 渠道底板扬压力计算方法	(26)
3.1 底板扬压力及一般处理方法	(26)
3.2 渗流计算的有限单元法概述	(28)
3.3 饱和渗流基本方程及有限元分析计算式	(29)
3.4 干区虚拟流动不变网格模拟分析方法	(30)
3.5 自由面穿过的单元体分析模拟	(30)
3.6 出渗边界模拟	(31)
3.7 渗流控制分析中密集排水孔模拟方法	(31)
3.8 各向异性渗流问题的基本解	(32)
3.9 各向异性无限渗流域中单个排水孔作用的解	(33)
3.10 排水孔几何边界的数学描述	(34)
3.11 边界条件分析及单个排水孔的准解析式	(34)
3.12 排水孔群的相互干扰作用分析	(35)
3.13 排水孔准解析式与有限元的耦合分析	(36)
3.14 计算程序简介	(37)
第4章 南水北调中线黄北段渠道抗浮研究	(38)
4.1 渠段基础地质特性	(38)
4.2 总干渠黄北段水文特征	(47)
4.3 设计方案	(65)

4.4 处理长度及处理方案 (121)

4.5 方案对比分析 (131)

4.6 推荐方案设计 (132)

第5章 砂卵石渠道基础施工 (133)

5.1 概 述 (133)

5.2 施工方法 (134)

5.3 施工过程中应注意的问题 (143)

参考文献 (144)

第 1 章 砂卵石渗透特性研究进展

河床砂卵石覆盖层属于非黏性颗粒体材料,多数见于山区河床或山前冲洪积地带。现有理论和研究方法都是来自于平原地区均匀砂基工程的研究,研究对象为颗粒级配相对均匀的非黏性砂土。我国的土工试验规程给出了测定渗透系数和测定渗透变形临界坡降的试验方法。

非黏性砂土渗透破坏研究一直是水利工程建设的一个重要问题,最期的研究多是与水闸基础稳定联系在一起。20 世纪 70 年代以前,国内研究多参考苏联的成果。80 年代以后,随着对外开放学术交流的增多,才开始引进西方国家的研究成果,当时国内的研究水平与国外基本相当。具有代表性的研究团队主要是当时的南京水利科学研究院毛昶熙先生的研究团队和北京水利科学研究院刘杰教授的研究团队,另外黄河水利科学研究院、长江科学院也在砂土渗透变形方面有比较多的研究。发表了大量的研究论文,出版了一批专著。

研究内容主要集中在砂土渗透破坏的形式以及相应的判别标准,非黏性土渗透系数的计算方法,以及非黏性土渗透破坏的试验方法研究。下面简单介绍具有代表性的研究成果。

1.1 砂土渗透变形破坏形式及判别方法研究

关于砂土渗透变形破坏形式,目前已经有了共识,可以归结为四种类型:管涌、流土、接触冲刷和接触流土。管涌土又可以分成发展型管涌土和非发展型管涌土,北京水利科学研究院刘杰教授认为,所谓非发展型管涌土“实际上属管涌和流土之间的过渡型”。接触冲刷和接触流土只在两种不同介质的接触面上发生,因此对于单一土层,渗透变形的形式主要是管涌和流土以及介于之间的过渡型。

对于单一土层发生管涌或流土破坏的判别,出现过多种方法,具有代表性的主要有以下几种。

1.1.1 不均匀系数法

这个方法是苏联 B. C. 伊斯妥明娜提出来的,有如下的判别式:

$$\begin{cases} C_u < 10 & \text{流土型} \\ C_u > 20 & \text{管涌型} \\ 10 < C_u < 20 & \text{过渡型} \end{cases} \quad (1-1)$$

B. C. 伊斯妥明娜在土的渗透稳定性研究方面的贡献主要表现在:①从理想土体的研究阶段进入了天然无黏性土的试验研究阶段;②阐明了一些无黏性土的渗透破坏特征,提出了自然界中土体渗透破坏的四种模式;③提出了将无黏性土区分为骨架和填料的概念,

并以 1 mm 的粒径尺寸作为骨架和填料的区分界限,认为细颗粒的含量影响混合料的抗渗比降,渗透系数取决于填料的颗粒组成和在骨架中所占的比例;④首次将无黏性土的渗透变形特性与颗粒组成特性相联系。

实践证明,该方法只适用于级配连续的土,对于级配不连续的无黏性土,不均匀系数 C_u 不能反映颗粒组成曲线形状与粗粒料含量之间的关系,普遍适用性不强。

1.1.2 孔隙直径与细粒粒径比较法

该方法是以细颗粒某一粒径 d 与土体空隙平均直径 D_0 的比值来判断土体的渗透破坏形式。主要有以下两种方法:

(1)甫拉维登法。其基本原理是:

$$\begin{cases} \frac{D_0}{d} > 1.3 & \text{管涌土} \\ \frac{D_0}{d} \leq 1.3 & \text{非管涌土} \end{cases} \quad (1-2)$$

该方法认为,如果土体中细颗粒的流失量不超过总土重的 3%,土体的渗透稳定性不会受到影响。

(2)刘杰法。该法采用以下标准:

$$\begin{cases} D_0 > d_5 & \text{管涌型} \\ D_0 = d_3 \sim d_5 & \text{过渡型} \\ D_0 < d_3 & \text{流土型} \end{cases} \quad (1-3)$$

式中若采用 $D_0 = 0.63nd_{20}$, 上式变为:

$$\begin{cases} \frac{d_5}{d_{20}} < 0.63n & \text{管涌型} \\ d_3 \leq 0.63nd_{20}, d_5 \geq 0.63nd_{20} & \text{过渡型} \\ \frac{d_3}{d_{20}} > 0.63n & \text{流土型} \end{cases} \quad (1-4)$$

$$(1-5)$$

$$(1-6)$$

另外,康特拉夫还提出了单峰土和双峰土的概念,所谓双峰土,是指缺乏中间粒径的土,单峰土则指级配连续的土,并给出了判别式:

$$\text{流土型} \quad D_0 = 0.214\eta d_{50} \quad (1-7)$$

式中 η ——系数, $\eta = \frac{d_n}{d_{100-n}}$;

d_n ——颗粒分曲线上含量为 n 的相应粒径;

d_{100-n} ——颗粒分曲线上含量为 $100 - n$ 的相应粒径;

n ——土的孔隙率。

1.1.3 采用土体细粒含量来判别

随着研究深入,人们逐渐认识到影响土体渗透性和渗透变形形式的因素中,细粒含量是主要因素。马斯洛夫指出,砂砾料的渗透性主要取决于细料填充粗料孔隙的程度,填充

得越完全,渗透性越小。伊斯妥明娜也提到细料对粗料孔隙的填充程度会引起渗透变形形式的变化。在这个问题上,国内学者做了深入研究。

(1)北京水利科学研究院刘杰教授根据细颗粒的体积等于粗粒(骨架颗粒)孔隙体积的原则,得到细粒含量为:

$$P_z = \frac{\gamma_{d1} n_2}{(1 - n_2) \gamma_{s2} + \gamma_{d1} n_2} \quad (1-8)$$

式中 γ_{d1} ——细粒本身的干容重;

n_2 ——粗颗粒本身在密实状态下的孔隙体积;

γ_{s2} ——粗颗粒的容重。

在试验中,针对缺乏中间粒径的天然砂砾料进行修正,得到:

$$P'_z = \frac{\gamma_{d1} n_2}{(1 - n_2) \gamma_{s2} + \gamma_{d1} n_2} + \frac{74}{\left(\frac{D_{15}}{d_{85}}\right)^{1.4}} \quad (1-9)$$

式中 D, d ——骨架和填料的粒径。

如果砂砾料实有的细粒含量小于式(1-9)计算得到的 P'_z ,则说明粗粒孔隙尚未被填料填满;反之,则说明细粒填料已经完全充填粗粒孔隙。对于缺乏中间粒径的砂砾料,判别式为:

$$\begin{cases} P_z > 35\% & \text{流土型} \\ P_z < 25\% & \text{管涌型} \\ 25\% < P_z < 35\% & \text{过渡型} \end{cases} \quad (1-10)$$

(2)南京水利科学研究院沙金煊教授根据填料充满骨架孔隙时有下式成立:

$$n_z = \frac{n}{n_{ck}} \quad (1-11)$$

式中 n_z ——填料本身的孔隙率;

n_{ck} ——骨架本身的孔隙率;

n ——全料的孔隙率。

推导出了

$$P_z = \frac{\sqrt{n}}{1 + \sqrt{n}} \quad (1-12)$$

然后根据试验资料得到修正式:

$$P_z = \alpha \frac{\sqrt{n}}{1 + \sqrt{n}} \quad (1-13)$$

式中 α ——修正系数,一般取 $\alpha = 0.95 \sim 1.00$ 。

因此,有判别式:

$$\begin{cases} P'_z > P_z & \text{流土型} \\ P'_z < P_z & \text{管涌型} \end{cases} \quad (1-14)$$

1.1.4 采用渗透系数来判别

这种方法是由刘杰教授在总结 $C_u > 5$ 的无黏性土的临界水力比降与渗透系数的关系后得出的。它的理论基础是:对于多级配的砂砾石料,孔隙通道的大小取决于细粒的含量及粒径。如果细粒的含量大于 30%,则整个土体孔隙大小取决于细粒的粒径和孔隙;如果细粒的含量小于 30%,则细粒填不满砾石的孔隙体积,因此土体孔隙大小取决于砾石的粒径和孔隙。提出的判别式为:

$$\begin{cases} K > 0.02 \text{ cm/s} & \text{管涌型} \\ K < 0.003 \text{ cm/s} & \text{流土型} \\ K = 0.02 \sim 0.003 \text{ cm/s} & \text{过渡型} \end{cases} \quad (1-15)$$

式中 K 为涌透系数。

以上各种方法,采用的判别指标和标准各不相同,都只适用于所研究的土类。对于粗粒与细粒(填料)粒径的划分标准并不尽相同,有的采用 1 mm 粒径,有的采用 2 mm 粒径。但这都是经验性的,对于不同种类的无黏性土,粗细料的划分标准并不相同,并且划分粗细料并不是目的,研究土体中粗细料的充填关系才是研究无黏性土渗透变形特性的根本。这要从无黏性土的级配关系以及粗细料颗粒与更大一级颗粒孔隙之间的填充关系来研究,才更加符合其客观物理本质。这都是需要进一步研究的问题。

1.2 砂砾石土承载骨架研究

最初,对于级配良好的无黏性土,并没有提出承载力骨架的概念。而是在研究粗细颗粒的填充关系时区分细颗粒和粗颗粒。所谓承载力骨架,是在研究级配特别分散的砂砾石料的渗透变形(破坏)问题时,先提出了抵抗渗透破坏的拱效应,而后才逐渐被人们认识并提出的。

苏联学者谢赫特曼在研究非黏性土的管涌现象时,采用了颗粒骨架和细颗粒填料的说法,并且根据试验提出了细颗粒能够随水流出的速度条件为:

$$u_* = u_0 + \frac{(1-\xi)^2}{a} \quad (1-16)$$

式中 u_0 ——起始临界速度;

a ——试验参变量;

ξ ——孔隙充填程度。

文中还给出了充填度 ξ 的计算方法。

在 1986 年的第二届水利工程渗流学术会议上,毛昶熙先生对当时的渗流研究现状作了比较全面的总结,其中在渗透稳定性研究方面说:在渗流研究的初期,渗流研究还没有涉及力在内的渗流冲刷、破坏或渗透变形等岩土工程稳定性问题。在渗流理论发展的头 20 年间,曾经产生过渗流研究在实际应用中的怀疑。即使是在闸坝地基渗流的破坏也只是从调查统计资料出发,规定出最短渗径长度(Bligh, 1910; Lane, 1935),还没有归结到应用渗流理论来研究的层次。

太沙基(K. Terzaghi, 1922)首先提出了渗流对岩土骨架破坏的主要因素是渗透力,并给出了简单实用的渗透力计算公式。同时,他在研究黑海淤泥质滩地的黏土试验中发现了孔隙水压力问题,并于1923年研究了与孔隙水压力密切相关的固结问题。为土体的渗透破坏分析打下了基础。明兹(1955)的著作《粒状材料水力学》为孔隙中颗粒流动的管涌现象提供了理论基础。随后,丘加也夫对渗透力和渗透阻力的理论进一步发展,并应用到闸坝地基(1962)和土坝(1967)的设计中去。达维登可夫(1964)对渗流稳定性作了全面的论述。伊斯妥明娜(1957)进行了大量试验和分析,给出各种不均匀系数土的管涌临界坡降值。鲁布契柯夫(1960)提出管涌土和非管涌土的概念。康德拉契夫(1958)提出发展性管涌和非发展性管涌等概念,都有实际意义。

R. 大卫登柯夫(1938)在试验中证实,反滤层中也存在拱效应,并且在形成拱以后,可以承受无限的渗透坡降,认为渗透水流的压力对它毫无影响,在反滤层设计时只要考虑颗粒级配组成,而不必关心渗透水流。当然,这一结论在肯定松散颗粒材料存在结构性的同时,也不免带有理想化的倾向。

苏联 E. A. 鲁布契柯夫在研究非黏性土的渗透破坏形式时,给出了理想非管涌土填充物颗粒粒径和骨架颗粒粒径的比值曲线:

$$\begin{cases} e_{i,k} = \frac{d_{i,k}}{D} = f(i) \\ e_{i,p} = \frac{d_{i,p}}{D} = f(i) \end{cases} \quad (1-17)$$

$$d_{i,k} = \frac{(2 - \sqrt{2})^2 D}{2[(3 - \sqrt{2}) + (i - 2)(2 - \sqrt{2})][(3 - \sqrt{2}) + (i - 1)(2 - \sqrt{2})]} \quad (1-18)$$

$$d_{i,p} = \frac{(3 - \sqrt{3})^2 D}{2[(6 - \sqrt{3}) + (i - 2)(3 - \sqrt{3})][(6 - \sqrt{3}) + (i - 1)(3 - \sqrt{3})]} \quad (1-19)$$

式中 D ——土骨架颗粒粒径;

$d_{i,k}$ 、 $d_{i,p}$ ——在骨架颗粒为立方体和菱形体排列情况时,第 i 级填充物的颗粒粒径,
 $i = 0, 1, 2, \dots$ 。

朱崇辉(2005)通过对不同级配粗粒土的渗透试验研究和相关性分析指出,粗粒土的渗透系数与反映其颗粒级配特征的不均匀系数和曲率系数存在较大的相关性,并以太沙基公式为例,将原有公式修正为与级配参数相关的函数表达式,从而体现出粗粒土渗透系数与级配特征的关系。

1.3 非黏性土渗透系数计算方法研究

非黏性土渗透系数的计算方法是从达西定律(Darcy's Law)导出的。最初,人们认为达西的渗透系数是一种经验系数。后来,随着研究的深入,人们逐渐认识到达西的经验系数代表了砂土的渗透特性,它反映了土的颗粒粒径大小、紧密程度、结构排列以及孔隙率等因素的综合指标,并且得出了砂土渗透系数的本构关系式:

$$k = \frac{gnD_0^2}{\alpha_2 32\nu} \quad (1-20)$$

式中 α_2 ——孔隙形状修正系数;
 D_0 ——土体的有效孔隙直径;
 g ——重力加速度;
 n ——土体孔隙率;
 ν ——流体的动力黏滞系数。

这里的 k 也有资料称之为渗透率(或水力传导系数),是与流体的黏滞性有关的。由于土工研究的流体是水,式(1-20)变为:

$$K = k\nu = 30.6 \frac{n}{\alpha_2} D_0^2 \quad (1-21)$$

可见,无黏性土的渗透系数主要取决于其有效孔隙直径,只要确定了土体有效孔隙直径的计算方法,渗透系数的计算式就基本确定。

计算无黏性土的有效孔隙直径有各种方法,其中有代表性的有以下几种。

1.3.1 理论方法

根据理想球体的两种典型排列方法:立方体方法和菱形方法,推导出有效孔隙直径的理论值

$$D_0 = (0.155 \sim 0.417)d \approx 0.286d \quad (1-22)$$

式中 d ——颗粒直径。

1.3.2 均匀无黏性土的有效孔隙直径

均匀无黏性土的有效孔隙直径的计算方法是在理论方法基础上,考虑土体颗粒及毛细管道形状修正系数提出的,有

$$D_0 = \frac{2}{3\alpha_1} \frac{n}{1-n} d \quad (1-23)$$

式中 α_1 ——考虑土体颗粒及毛细管道形状修正系数,为天然土颗粒表面积与同等体积球体表面积的比值,对于天然砂砾石, α_1 的变化范围为 1.5 ~ 1.9, 可以取 1.7。

再将理想球体紧密排列和疏松排列时的孔隙率代入,则有

$$D_0 = (0.137 \sim 0.356)d \approx 0.25d \quad (1-24)$$

1.3.3 天然不均匀土的有效孔隙直径

在自然界中,经常可以见到无黏性土的颗粒级配曲线不同,但渗透系数却接近的情况。设想如果将天然不均匀土简化为一种等效的等粒径的均匀土,则天然不均匀土的等效孔隙直径就可以按照均匀土的方法来确定。这就转化为寻找非均匀土的等效粒径问题。

近百年来,提出了多种确定不均匀土等效粒径的方法。归纳起来有平均粒径法、中值

粒径法、半经验法、概率分析法等。

在研究非均匀土的渗透性问题的实践中,人们逐渐认识到了细颗粒在渗透性方面的主导地位。北京水利科学研究院的试验资料显示,水利工程实践中研究散粒体材料的渗透特性时通常采用 5 mm 的粒径作为区分粗粒料和细粒料的特征粒径。但从试验资料发现,5 mm 的粒径对渗透性起不了控制作用,而应该增加其含量指标,方能控制材料整体的渗透性,并且在试验中发现,对于碎石土,随着细颗粒含量增加,渗透系数具有先减小、后增大的客观现象。南京水利科学研究院在研究长河坝水电站黑马料场心墙碎石土的渗透特性时也发现,当细粒含量为 55% 时,碎石土的渗透系数最低。

人们知道,无黏性土的渗透系数与其抗渗比降成反相关关系,渗透系数越小,其抵抗渗透破坏的能力越强,相应的抗渗比降越高;反之亦然。从以上研究内容和成果可见,对于无黏性土渗透系数的研究,归根到底是对材料颗粒级配关系和大小颗粒充填关系的研究。因为材料颗粒级配关系的不确定性,很难找到能够反映材料级配关系的粒径级别。因此,采用某一种特征粒径研究其渗透性的方法就不可避免地带有片面性。这也就是前述成果只适用于某一种无黏性土的根本原因。

研究实践已经证明,特征粒径能够代表该粒径所在的某一段粒径区间的材料颗粒级配特征,但不能代表该区间以外的粒径级配特征。这就是基于特征粒径方法推导的计算式与连续级配土的试验值更吻合的原因。所以,对于像河床砂卵石覆盖层这样的材料,必须考虑能够概括级配曲线形状的指标组合关系式,才能相对全面地反映它的级配、充填特点。

1.4 非黏性土临界坡降研究

砂土的临界坡降是工程渗透稳定性研究的重要问题,我国现行的《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2001)以及类似的规范都规定以允许坡降作为判别砂土是否能够保持渗透稳定的判据,而允许坡降就是临界坡降与安全系数的乘积。砂土的临界坡降研究一直是该领域研究的热点问题。针对不同的渗流问题曾经提出了多个理论的或半经验的计算公式,但是目前通过试验确定砂土的临界坡降是最常用的方法。

在理论研究方面,关于砂土的临界渗透坡降,历史上有许多试验公式来计算砂土的临界渗流速度或坡降,但多数只适用于他们所研究的砂土类型。其中有代表性的有太沙基(K. Terzaghi)公式:

$$I = (\delta - 1)(1 - n) \quad (1-25)$$

式中 I ——临界水力坡降;

δ ——砂土的比重;

n ——砂土的孔隙率。

在土坝斜坡上渗流出口处,根据颗粒的力学平衡,得到临界坡降

$$I_0 = \frac{\gamma'}{\gamma_B} (\tan \varphi_{\sigma\sigma} \cos \alpha - \sin \alpha) + \frac{C_{\sigma\sigma} l}{\gamma_B} \quad (1-26)$$

式中 I_0 ——临界坡降;

γ' ——土的浮容重;

γ_B ——水的容重;
 α ——斜坡的倾角;
 $\varphi_{\sigma\sigma}$ 、 $C_{\sigma\sigma}$ ——砂土的内摩擦角和黏聚力;
 l ——在渗流方向上的长度。

当渗流方向自下往上时,临界渗透坡降为:

$$I_0 = \frac{\gamma'}{\gamma_B} (1 + \tan \varphi_{\sigma\sigma}) + \frac{C_{\sigma\sigma} l}{\gamma_B} \quad (1-27)$$

实践证明,上述经验公式只适用于砂土密度较小,且不考虑砂土颗粒摩擦力和黏聚力的情况。砂土的黏聚力和摩擦力是渗透变形发生的阻力,在紧密的砂土中,颗粒相互间的摩擦力对提高临界坡降具有重要意义。因此,在渗透砂土上增加重力荷载会提高它的临界坡降。

在目前的河床砂卵石覆盖层地勘实践中,并未考虑砂卵石覆盖层加载后的临界坡降变化问题。地勘属于前期勘察阶段,砂卵石覆盖层的渗透系数和临界坡降一般是通过抽水(或压水)试验,并辅助进行室内试验得到的。试验过程没有加载,得到的试验成果也没有经过加载后的修正。

实际上建坝以后,坝体自重压缩砂卵石覆盖层,砂卵石覆盖层会发生比较大的沉降变形,同时其应力状态也大为改变。也就是说,运行期间砂卵石覆盖层的状态与地勘期间的状态已经大不相同。这时,因为受到压缩变形,河床砂卵石覆盖层的孔隙率变小,渗透系数也相应降低,临界坡降必然升高。可见,地勘得到的指标已经不能代表运行期间砂卵石覆盖层的渗透特性,必须进行相应的修正。遗憾的是,目前并没有类似的研究成果为指标修正提供参考,需要进行深入研究。

1.5 渗透变形(破坏)试验方法研究

在无黏性土渗透变形研究过程中,渗流试验扮演了重要的角色。离开试验,颗粒材料渗透变形研究是不可想象的。渗流试验分为实验室试验和野外试验。实验室试验已经发展了多种试验方法,包括砂模型试验、黏滞流模型试验、水力网模型试验(水力积分仪)、导电液模型试验、电阻网模型试验等。野外试验主要有压水试验、抽水试验、单环(双环)渗透试验等。另外,根据试验目的不同,还发展了多种特殊试验,比如接触冲刷试验、裂缝自愈试验、反滤层的保土抗渗试验等。这里详细叙述在实验室内进行的无黏性土渗透变形(破坏)试验。

1.5.1 常规渗透试验

常规渗透试验的试验目的是测定砂土的渗透系数,一般是定水头试验,也可做变水头试验。渗透变形试验用于测定砂土料的渗透变形临界坡降。这些试验都是常规试验,在《土工试验规程》(SL 237—1999)上都有详细的试验方法。其中,渗透变形试验根据研究对象的不同,又分从上往下渗透、从下往上渗透、水平渗透等,对于同一种砂土,各种方法测到的临界坡降并不相同。造成测量结果不同的原因是渗流方向的差异,导致渗透力的

作用方向不同。常规渗透试验只测量试样上下游的水头差和流量,并推导渗透系数和渗透坡降,不测量试样的变形。

1.5.2 非常规渗透变形试验

非常规试验都是针对某一具体工程问题进行的砂槽模型试验。试验的相似律遵循坡降相似的原则,一般采用原状土。国内有多位学者针对不同的问题开展了具有特色的砂槽模型试验。冯郭铭、付琼华(1997)为研究天然层状土的渗透特性,设计了测定双向渗透系数的试验装置。李广信等(2005)利用砂槽模型试验研究了二元堤基管涌发展过程,得到了二元砂土管涌发生发展模式的定性描述,并得到了防渗墙深度与管涌发展的一些定量关系。毛昶熙(2004)根据源汇点理论推导出了计算管涌向上游冲蚀发展的简易公式和迭代计算方法,并通过砂槽模型试验研究了管涌产生和发展的水力条件。在试验中提出了管涌有害与否与沿程承压水头分布的不断调整和渗流量变化密切相关的结论。张家发等(2002)通过砂槽模型试验研究了长江堤防垂直防渗墙的作用效果,得出了悬挂式防渗墙对渗透变形的发生条件影响很小,但对渗透变形的扩展及模型破坏的条件影响显著的结论。砂槽模型试验最关键的是上表面砂卵石覆盖层的形式,不同的砂卵石覆盖层形式会影响临界坡降的取值。国内有多位学者采用不同的砂卵石覆盖层做过类似的试验,得到的结果却相差很大。有的采用有机玻璃板、水泥砂浆、黏土层、柔性密封水袋等。产生试验结果差异的主要原因是接触面上容易产生接触渗漏,导致试验失败而又不易发觉。

1.6 渠道防渗研究

现有的渠道工程大多用于农田水利工程的大型灌区灌溉。在全球范围内,像南水北调这样的大型渠道目前建成的工程极少,建在砂卵石地基上的类似工程更是少见。

渠道防渗是一个古老的工程问题,据《新疆图志》记载,清光绪六年(1880年),哈密县修石城子河时,左宗棠曾用毛毡铺垫渠坡渠底进行防渗,把水从山口引入灌区进行军屯。比新疆年代更久远的四川都江堰灌区,很早就采用干砌卵石的渠道防渗技术。

新中国成立以来,我国渠道防渗工作发展很快,防渗材料、衬砌结构和施工技术都取得了许多经验与研究成果。渠道防渗工程措施的种类很多,按防渗材料分,渠道防渗有土料、水泥石、石料、膜料、混凝土和沥青混凝土等类;就防渗原理而言,不外乎两类:第一类是在渠床上加做防渗层(体),第二类是改变渠道土壤渗漏性能。

根据所采用的原料和工程特点,可分为以下几种:

(1)土料防渗。土料防渗是指以黏土、灰土、三(四)合土等为材料修建的渠道。据实测资料,土料防渗每天每平方米的渗漏量为 $0.07 \sim 0.17 \text{ m}^3$,是一种技术简单、造价低廉的防渗技术。缺点是冲淤流速难以控制,在北方抗冻能力差,维修养护工程量大。目前,这种古老的渠道防渗措施已逐渐为新的防渗材料和技术所取代。

(2)水泥石防渗。水泥石防渗是将土料、水泥、水拌和而成,渗漏量与土料防渗效果相一致,为每天每平方米 $0.06 \sim 0.17 \text{ m}^3$ 。水泥石防渗因施工方法的不同,分为干硬性水

泥土和塑性水泥土两种。水泥土防渗不宜在有冻害的寒冷地区使用,只适用于无冻害的地区。

(3)砌石防渗。根据所采用的原料和砌筑方法,砌石防渗分为干砌块石、干砌卵石、干砌料石和浆砌卵石、浆砌块石、浆砌料石等多种型式。砌石防渗的优点是可就地取材、抗冲刷和耐磨性能好。一般渠内流速可达 $3.0 \sim 6.0 \text{ m/s}$,大于混凝土防渗渠的抗冲流速。就连干砌卵石的抗冲流速也在 $2.5 \sim 4.5 \text{ m/s}$ 。其次,抗冻和抗渗的能力也较强。每千米的渗漏损失在 $0.3\% \sim 2.0\%$ 。但砌石防渗由人工施工,无法实施机械化,因而工程质量难以达到一致的标准。

(4)土工膜防渗。采用塑料薄膜或土工膜料防渗有较好的防渗效果,一般可减小 90% 左右的渗漏损失,同时具有施工速度快、造价低等优点。需注意的是,膜下需设垫层,保证土工膜与垫层接触面的稳定性,防止土工膜被刺穿而渗漏。

(5)混凝土板防渗。用混凝土板衬砌渠道是目前广泛采用的一种渠道防渗技术。其防渗效果优于其他各种防渗措施,一般能使渗漏损失减少 $90\% \sim 95\%$ 。其次,混凝土防渗的强度高,糙率小($n=0.014 \sim 0.07$),允许流速较高。

(6)暗管防渗。采用暗管输水防渗防冻是灌区输水系统中最为完善的型式,防渗效率一般在 95% 以上。虽然一次性投资较高,但使用年限长,一般可使用 30 年以上。用亩年投资费用比这一指标来分析,还是经济的。由于暗管防渗不受气候因素的影响,我国采用暗管防渗的输水工程项目也在不断增多。

我国各地气候、土质、材料、水渠等条件不同,防渗措施及防渗体结构也不尽相同。例如,在石料丰富地区,应首先考虑用块石、卵石或条石衬砌。随着石油工业和塑料工业的发展,用沥青材料和塑料薄膜防渗日益得到广泛采用。

土工膜防渗就材料本身而言存在光面膜、加糙膜、复合土工膜,以及各种厚度的土工膜。就铺设形式而言,有水平铺塑、垂直铺塑等多种形式。结合各种施工形式,开发了相应的机械施工设备,大大提高了施工效率。银川市唐徕渠渠堤防渗就采用垂直铺塑防渗,工程铺塑深度 $8 \sim 9 \text{ m}$,PE 膜厚度 0.3 mm 。设计标准断面如图 1-1 所示。

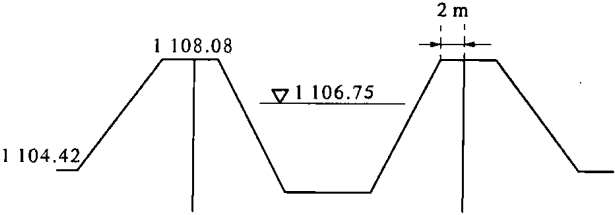


图 1-1 银川市唐徕渠渠堤防渗垂直铺塑示意图

加固土是一种新型的防渗材料,它是利用化学或生物技术,对土壤进行加固,并结合一定的工程技术措施使其达到工程使用的要求。国内外所应用的固化剂种类一般有电离子类、生物酶类、水化类等。固化材料广泛应用于道路、水利以及环保工程。ISS (Ionic Soil Stabilizer) 是美国开发研制的一种新型的电离子土壤固化材料,是由多种强离子化合物组合而成的水溶剂,适用于黏土粒含量 25% 以上的各种土类。ISS 经稀释后均匀地按比例掺入土壤中,压实后通过电化原理改变黏土颗粒双电层结构,能永久地将土壤的亲水

性变为疏水性,同时易于压实,形成坚固的板块结构。从 20 世纪 70 年代起,ISS 已在世界上数十个国家与地区的水利、交通、旅游等行业得到广泛使用。

在我国,已建有一些固化剂的防渗渠道试验工程,如 WH 系列土壤固化剂在江西省兴国县长冈水库灌区塘石段渠道改造工程中的试验应用。固化剂“奥特赛特 2000 号”在山东省葛沟灌区节水改造工程进行土渠渠底土壤固化处理。在河套灌区选择了 4 种土壤固化剂进行渠道防渗试验,即 HY 高性能土壤固化剂、路特固 LPC2600LE23001 土壤固化剂、帕尔玛土壤固化酶、沙特固 SSS 固化剂。另外,液态液体固化剂有 SR,外观为白色,只要在 SR 固化土中掺加适量的水泥,可以直接用做渠道防渗体,但尚未有工程实例。

1.7 渠道抗浮研究

灌溉用渠道一般建在地表土层之上,不存在抗浮问题。但南水北调中线一期工程黄北段位于砂卵石之上,并且一些渠段地下水位较高,存在抗浮问题。更重要的是,该地区汛期洪水来势猛,短期流量大,砂卵石地基渗透性强,对渠道底板浮托作用明显,需要开展专门的抗浮设计。

工程上,抗浮设计多用于地下结构工程、海洋结构工程等位于自然水位以下的工程构筑物的抗浮稳定问题。我国《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2001)、《溢洪道设计规范》(SL 253—2000)等规范文件都有具体的抗浮技术措施标准。

抗浮设计方法种类较多,根据抗浮原理主要有“放”与“抗”两类。所谓“放”,是指采取工程措施,将结构物底板之下的水压力释放,包括降水抗浮(见图 1-2)和设观察井抗浮。所谓“抗”,是指采用加载等方法抵抗结构物之下的水压力,包括配重抗浮、锚固抗浮(主要包括锚杆、抗拔桩(见图 1-3)、锚索等)。

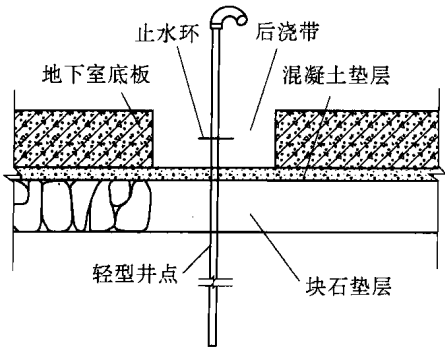


图 1-2 排水降压抗浮示意图(华锦耀等,2003)

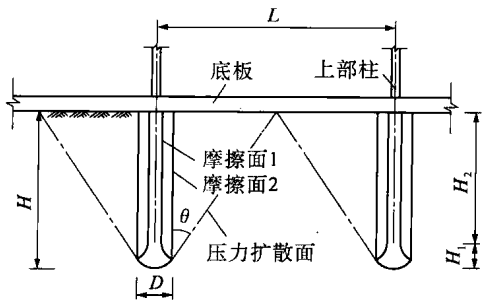


图 1-3 扩底桩抗浮示意图(华锦耀等,2003)

人们在工程实践中,针对具体的工程条件,也提出了一些形式不同的抗浮措施。

1.7.1 抗浮锚桩法

此方法是在工民建工程中大量应用的抗浮技术,采用高压注浆工艺,使浆液渗透到岩土体的孔隙或裂隙中,锚杆侧摩阻力比抗拔桩大,更有利于抗浮,且造价低,施工方便。但是普通锚杆受拉后杆体周围的灌浆体开裂,使钢筋或钢绞线极易受到地下水的侵蚀,影响