

# 接触冲刷研究进展

常利营<sup>1,2</sup> 陈 群<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065 ;

2. 四川大学水利水电学院 四川 成都 610065 )

**摘要** :基于国内外接触冲刷的研究成果 ,分析了渗流接触冲刷的发生机理 ,比较了在无黏性土层、砂砾石层与黏土层接触面上发生接触冲刷的不同机理 ,总结了不同土层间接触冲刷的研究进展 ,并提出这一领域待研究的关键问题。

**关键词** :接触冲刷 ;渗透破坏 ;渗透变形 ;接触面

中图分类号 :TV471.8 ;TV433

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)02-0079-04

**Progress in contact scouring research**//CHANG Li-ying<sup>1,2</sup>, CHEN Qun<sup>1,2</sup> 1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China ;2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China )

**Abstract** :Based on the domestic and foreign research achievements about contact scouring, the mechanism of seepage contact scouring is analyzed in this paper. The difference of contact scouring occurred at the interface of cohesionless soils and the interface between gravel and clay is compared. Studies on contact scouring occurred in different soils are discussed and summarized. The key points required for further research in this field are proposed.

**Key words** :contact scouring ;seepage failure ;seepage deformation ;interface

一般来说,地表水流的冲刷破坏比较容易发现和挽救,而地下水的渗流冲刷不易观察和发现,常被忽视,一旦出现问题,会迅速导致工程的破坏,难以补救。例如,1976年美国高约93m的Teton坝在初次蓄水时发生溃坝事故,其原因是防渗心墙开裂造成管涌,但管涌发生开始于心墙和基岩接触面的接触冲刷<sup>[1-3]</sup>。1990年,山东省弥河支流石河上游嵩山水库土坝下游砌石坡面缝中出现渗漏,之后出现坍塌和面积渗漏,经过开挖调查发现主坝心墙在胶结卵石层接触面发生接触冲刷是引起破坏的主要原因<sup>[4]</sup>。1993年,青海省沟后混凝土面板堆石坝发生溃坝事故,导致300多人死亡,其溃坝原因是面板顶端与挡水墙底板连接的水平缝橡胶止水埋设质量低劣,严重漏水,挡水墙底板与砂砾石间产生接触冲刷及坝体砂卵石产生管涌,最终挡水墙沉陷倾倒断裂,库水漫顶<sup>[5]</sup>。从国内外统计分析来看,由于渗透破坏发生事故或失事的土石坝占总数的30%~40%<sup>[6]</sup>,而接触冲刷破坏占很大的比例。因此,接触冲刷问题越来越引起工程师和学者们的重视。

上下两层间的颗粒直径悬殊越大就越容易发生接触冲刷<sup>[7]</sup>。在实际水利工程中水流沿着两种介质面流动,例如坝体与坝基、心墙与基岩等,特别是砂砾石与黏性土的接触面,最容易发生接触冲刷破坏<sup>[8]</sup>。根据形成接触面的两种介质刚度的差异度,可以将土体接触面归纳为两种类型,一种是土体与刚性介质的接触,包括土体与基岩、防渗墙、桩孔护壁、涵管以及闸底板之间的接触;另一种是不同土体之间的接触,包括无黏性土层间、砂砾石层与黏土层、心墙与反滤层、黏土与粉土<sup>[9]</sup>之间的接触。在前一种接触面上发生的接触冲刷破坏,国内外学者都已经做了大量的研究工作,本文主要总结在后一种接触面上有关接触冲刷的研究进展。

## 1 接触冲刷发生机理

渗透变形的形式及其发展过程与地质条件、土粒级配、水力条件、防排水措施等因素有关,通常可分为4种类型<sup>[10]</sup>:管涌、流土、接触冲刷和接触流土。接触冲刷是指流体沿着两种不同介质的接触面

基金项目 :教育部博士点基金(20100181110076)

作者简介 :常利营(1986—),女,河南巩义人,博士研究生,主要从事岩石体渗透特性和坝坡稳定性研究。E-mail :logive@126.com

流动时,把其中颗粒层的细颗粒带走的现象<sup>[10]</sup>。土体的接触面往往是较薄弱的位置,也是渗透破坏最易发生之处<sup>[11]</sup>。一般情况下,发生管涌的临界渗透坡降小于流土的临界渗透坡降,接触冲刷的临界渗透坡降小于管涌的临界渗透坡降,接触流土的临界渗透坡降大于接触冲刷的临界渗透坡降<sup>[12]</sup>。在单一性状的土层中,一般发生管涌或流土破坏,在多层土中一般发生接触冲刷或接触流土破坏<sup>[13-14]</sup>。

接触冲刷的本质是细土层中的细颗粒从粗土层孔隙中流失,当粗土层中的孔隙直径大于细土层中可以移动的颗粒粒径时,接触冲刷才具备基本条件,这种基本条件称为几何条件,也就是土层本身所具备的条件,是内因。另一条件是外部条件,即推动可移动颗粒运动的条件,称为水力条件。只有同时具备了这两种条件,层状土在层间渗流的作用下才会产生接触冲刷<sup>[15]</sup>。

对于处于稳定渗流状态的层状土,由于两层土的渗透系数不同,所以两层土中的水流速度也有差异,在土层接触面上的渗流速度一般较大,当渗透坡降不断增大时,接触面上的渗流流速也增大到可以推动细颗粒移动的速度,此时细颗粒就会通过接触面上或粗土层中的空隙通道被水流带走,形成接触冲刷破坏。对于不同组成结构的层状土,其压实度、颗粒组成、应力状态等都各有不同,因此土层接触面上细颗粒能否起动以及移动时所需要的渗透坡降也不相同。

刘杰<sup>[15]</sup>2011年详细分析了接触冲刷的破坏机理,指出对于最小颗粒粒径大于0.075 mm的无黏性土,当 $D_{20}/d_{20} \leq 7.8$  ( $D_{20}$ 为粗土层的有效粒径, $d_{20}$ 为细土层的有效粒径)时两土层之间渗流速度的差异逐渐消失,不存在接触冲刷问题;或者两土层渗透系数之比小于或等于60,同样不存在接触冲刷问题。

砂砾石层与黏土层的接触面受到渗透水流的作用时,在较小的水力坡降下砂砾石层中的细颗粒首先被带走,随着水力坡降的不断增大,黏土层开始发生渗透破坏。黏性土的接触冲刷与无黏性土的接触冲刷在机理上的差异,主要反应在接触冲刷发生时土颗粒的起动机理上有所不同。黏性土本身的特性决定了黏土团粒间的相互作用小于黏土颗粒之间的作用力<sup>[16-18]</sup>,因此发生接触冲刷时被渗透水流冲出的是黏土颗粒团而非单个黏土颗粒。

陈建生等<sup>[19]</sup>讨论了砂砾石层与黏土层发生接触冲刷时细砂从接触面因渗流冲刷而流失的发展过程,并将接触面的渗透性用光滑裂隙的渗透性代替,将渗流出口视为承压完整抽水井,基于井流理论,通过分时段稳定流计算模拟了接触冲刷的全过程。

王保田等<sup>[9]</sup>在渗流槽中进行了有悬挂式防渗墙的二元结构堤基的渗流模拟试验,试验结果表明:对于上部为粉质黏土、下部为粉土的二元结构堤基,发生渗透变形时首先在粉土层的薄弱部位发生涌砂,接着在粉质黏土层与粉土层的结合层面发生接触冲刷,在水位持续升高超过临界水位后,渗透通道从下游向上游发展而贯通,即发生渗透破坏。

## 2 接触冲刷水力坡降计算公式

影响土体接触冲刷的因素包括土层的组成、粒径大小和颗粒级配、土体的渗流特性、抗剪强度、受力状态与变形情况和渗流冲刷坡降等,在判别土体是否发生接触冲刷破坏时应尽量全面地考虑这些因素。

### 2.1 无黏性土层

依斯托美娜<sup>[20]</sup>根据试验结果得出,接触冲刷临界水力坡降与相邻土层的有效粒径和较细土层的摩擦系数有关,即

$$J_{c.cr} = f\left(\frac{D_{10}}{d_{10}\tan\varphi}\right) \quad (1)$$

式中: $D_{10}$ 为粗土层的有效粒径; $d_{10}$ 为细土层的有效粒径; $\tan\varphi$ 为细土层的摩擦系数; $J_{c.cr}$ 为接触冲刷临界水力坡降。

式(1)将细土层的摩擦系数考虑在内,试验结果表明,当 $D_{10}/d_{10} < 10$ 时,成层土中不会产生渗流接触冲刷。

范德吞<sup>[21]</sup>认为接触冲刷水力坡降大小只与细土层和粗层粒径平均值之比有关,根据试验资料得出两者呈近似线性关系的结论。当两土层粒径平均值之比增大时,产生接触冲刷的水力坡降也随之增大,即土层粒径相差越大,越容易发生接触冲刷。

陶同康等<sup>[22]</sup>从土层接触面上土颗粒的受力平衡出发,推导出无黏性土接触冲刷临界水力坡降的计算公式:

$$J_{c.cr} = 0.181\alpha \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \left( \frac{1 - n_1}{D_{0k}} + \frac{1 - n_2}{d_{0k}} \right) d_{10} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为土颗粒的形状系数; $\rho_s$ 为土颗粒的密度; $\rho_w$ 为水的密度; $n_1$ 为粗土层的孔隙率; $n_2$ 为细土层的孔隙率; $D_{0k}$ 为粗土层的等效粒径; $d_{0k}$ 为细土层的等效粒径。

式(2)较全面地考虑了产生接触冲刷的各种影响因素,但是式中的参数较多且难以确定,因此计算结果有较大的不确定性。

全苏水工科学研究院的研究结果<sup>[23]</sup>表明,当细土层的某含量的粒径 $d_i$ 与粗土层的孔隙直径 $D_0$ 之比 $d_i/D_0 < 0.7$ ,且渗流的雷诺数 $Re < 20$ 时,两土层之间的渗流才会出现接触冲刷,并建议按式(3)确定

在竖向渗流作用下粗细两土层之间接触冲刷的临界水力坡降：

$$J_{c.cr} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_1}} \left( 3 + 15 \frac{d_i}{D_0} \right) \frac{d_i}{D_0} \sin \left( 30^\circ + \frac{\theta}{8} \right) \quad (3)$$

其中  $D_0 = 0.455 \sqrt[6]{C_u} \frac{1-n_1}{n_1} D_{17}$

式中： $\varphi_1$  为系数，砂砾石取 1.0，碎石取 0.35~0.4； $\theta$  为重力方向与水流方向的夹角； $C_u, D_{17}$  为粗土层的不均匀系数和等效粒径。

采用公式(3)时取  $d_i = d_3$ ，即小于该粒径的土质量占总土质量的 3% 对应的粒径。式(3)过于复杂，在实际工程中很难应用。

刘杰<sup>[4]</sup>2006 年曾建议成层无黏性土层间接触冲刷的允许水力坡降按式(4)或按表 1 确定：

$$J_{cr} = \frac{1}{1.5} \left( 7.6 + 24.8 \frac{d_{10}}{D_{20}} \right) \frac{d_{10}}{D_{20}} \quad (4)$$

式中： $J_{cr}$  为接触冲刷允许水力坡降。

表 1 成层无黏性土层之间渗流接触冲刷水力坡降

$D_{20}/d_{10}$	临界水力坡降 $J_{c.cr}$	允许水力坡降 $J_{cr}$
10	1.000	0.67
20	0.440	0.29
30	0.280	0.14
50	0.160	0.11
70	0.110	0.07
100	0.076	0.05

若渗流方向为水平方向， $D_0 \approx 0.2D_{20}$ ， $d_i \approx d_{10}$ ，

则式(3)可简化为  $J_{c.cr} = \left( 7.6 + 24.8 \frac{d_{10}}{D_{20}} \right) \frac{d_{10}}{D_{20}}$ ，取安全系数为 1.5，则可得到式(4)的允许水力坡降计算公式。由此可以看出式(3)和式(4)也主要考虑了粗细土层有效粒径的比值大小，允许水力坡降随着  $D_{20}/d_{10}$  的减小而增大，当  $D_{20}/d_{10} < 10$  时在两土层的接触带不会产生渗流接触冲刷。

2011 年，刘杰<sup>[15]</sup>根据试验资料进一步提出两水平土层之间产生接触冲刷时临界水力坡降与颗粒组成之间的关系为  $J_{c.cr} = 6.5 \left( d_{10}/D_{20} \right) \tan \varphi$ ，若取 1.2 的安全系数，允许水力坡降为  $J_{cr} = 5.4 \left( d_{10}/D_{20} \right) \tan \varphi$ ，其中  $\varphi$  一般在  $32^\circ \sim 39^\circ$  之间变化，可取  $35^\circ$ 。

## 2.2 砂砾石层与黏土层

邓伟杰<sup>[24]</sup>2008 年利用自行研制的接触冲刷仪对砂砾石层与黏土层进行了接触冲刷试验研究，结果表明较细级配砂砾石层与黏性土层的接触冲刷水力坡降大于较粗级配砂砾石层与黏土层的接触冲刷水力坡降，黏性土的密度是影响接触冲刷的次要因素，原状黏性土的接触冲刷水力坡降大于重塑黏性土的接触冲刷水力坡降，接触冲刷发生时，渗透系数逐渐减小，当达到破坏水力坡降时，渗透系数突然增

大。通过对接触面上的土颗粒进行受力分析，邓伟杰<sup>[24]</sup>得出了黏性土层与砂砾石层接触冲刷临界水力坡降的计算公式：

$$J_{c.cr} = \frac{1}{\rho_w g} \left( \frac{1-n_1}{D_{\theta k}} + \frac{1-n_2}{d_{\theta k}} \right) \cdot$$

$$[c_1 \mu \sigma + c_2 (\sigma \tan \varphi + c) - c_3 (\rho_s - \rho_w) g D_i] \quad (5)$$

式中： $c_1, c_2, c_3$  为实验参数； $\rho_w$  为水的密度； $\rho_s$  为土颗粒的密度； $g$  为重力加速度； $n_1$  为粗土层的孔隙率； $n_2$  为细土层的孔隙率； $D_{\theta k}$  为粗土层的等效粒径； $d_{\theta k}$  为细土层的等效粒径； $\mu$  为侧压力系数； $\sigma$  为正压力； $D_i$  为黏土粒团的直径； $c, \varphi$  为黏土的黏聚力和内摩擦角。

由于黏性土的黏结力比土团的重力大很多，因此忽略重力项的影响，且假定颗粒为球体时，式(5)

可简化为  $J_{c.cr} = \frac{1}{\rho_w g} \left( \frac{1-n_1}{D_{\theta k}} + \frac{1-n_2}{d_{\theta k}} \right) c_4 \tau_f$ ，其中  $c_4$  为实验参数，由此可看出，土层孔隙率越大，临界水力坡降越小，抗剪强度越大，临界水力坡降越大，等值粒径越大，临界水力坡降越小。

刘建刚<sup>[25]</sup>在研究接触冲刷的稳定并流模型中，根据井流计算理论，视出渗口为承压完整井，涌水量  $Q$  为抽水井流量，设渗透层厚度为  $M$ ，地层渗透系数为  $K$ ，视河岸为直线透水边界，井中心至直线透水边界的垂直距离为  $a$ ，通过镜像法(图 1)可得出接触冲刷发生初期任一点  $P(x, y)$  的水力坡降计算公式为

$$K(x, y) = \frac{Q}{\pi M} \frac{a^2}{[(a-x)^2 + y^2][(a+x)^2 + y^2]} \quad (6)$$

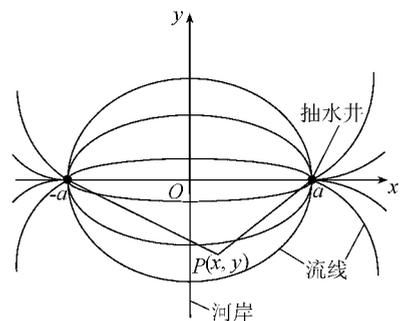


图 1 镜像法原理平面示意图

刘建刚<sup>[25]</sup>采用模型计算模拟了接触冲刷的发展过程，通过模型中各单元的渗透系数与水力梯度求出该单元的渗透流速，如果流速达到了细颗粒的起动速度，则发生接触冲刷，细颗粒被带出单元，结果表明接触面附近的细砂从出渗口开始流出，出渗口附近的渗透系数首先增大，然后逐步向内部发展，直至形成贯通性集中渗漏通道。式(6)在实际工程中难以用来判定接触冲刷的发生，需要对实际工程

进行简化,建立模型,通过对模型的计算来判断是否发生渗流破坏,可以应用于接触冲刷发生过程的反演计算。

### 3 待研究的关键问题

综观目前国内外对接触冲刷的研究,不难发现对不同土层之间接触冲刷问题的研究还很少,仍需要进行大量的研究工作,应主要考虑以下几个方面:

a. 对于砂砾石层与黏土层的接触冲刷问题,还要从土的黏性与抗剪强度、砂砾石的密度等方面研究其对接触冲刷的影响<sup>[24]</sup>,发生接触冲刷后对土体的抗剪强度的影响也有待进一步研究。

b. 由于不同土体的物理性质不同,因此在外力作用下会产生不同的变形,如两土层由于变形模量不同发生剪切变形,在接触面会发生一定的剪切位移,此时接触面的抗冲刷能力会发生怎样的改变还有待试验和理论的进一步研究;土体实际上处于三向应力状态中,接触面附近土体的应力状态对接触冲刷的影响也有待深入研究。

c. 在土石坝心墙料与反滤料的接触面上,除了会发生接触流土外,沿着接触面也有可能发生接触冲刷的破坏,而有关这方面的研究工作几乎没有开展。

d. 不同土层发生接触冲刷的临界水力坡降的计算公式还未得到统一,且现有的公式中都没有考虑剪切变形的影响,有些公式中参数过于复杂且难以确定,也没有得到大量工程实践的检验,因此应该结合工程实际,找出影响接触冲刷的主要因素,全面给出接触冲刷发生的临界指标<sup>[10]</sup>。

e. 在微观数值模拟方面,可以通过建立土层结构的微观模型来模拟接触冲刷发展的过程,详细研究接触冲刷的发生机理,并结合试验推导并验证接触冲刷发生条件的判定公式,为工程实践提供参考依据。

#### 参考文献:

[1] SEED H B, DUNCAN J M. The Teton Dam failure: a retrospective review [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden [s. n.], 1981: 219-238.

[2] SHERARD J L. Lessons from the Teton Dam failure [J]. Engineering Geology, 1987, 24(1/2/3/4): 239-259.

[3] PENMAN A D M. The failure of Teton Dam [J]. Ground Engineering, 1977, 10(6): 18-27.

[4] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训 [M]. 北京: 水利电力出版社, 2006.

[5] 顾淦臣. 国内外土石坝重大事故剖析: 对若干土石坝重大事故的再认识 [J]. 水利水电科技进展, 1987, 17(2): 13-20.

[6] 牛运光. 从我国几座土石坝渗流破坏事故中吸取的经验教训 [J]. 水利水电技术, 1992(7): 50-54.

[7] 邓伟杰, 路新景. 接触冲刷研究现状及存在问题的解决思路 [EB/OL]. (2008-03-11). <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/200803-256>.

[8] 高峰, 詹美礼. 法向力作用下接触冲刷破坏的实验模拟研究 [EB/OL]. (2007-10-23). <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/200710-398>.

[9] 王保田, 陈西安. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 2766-2771.

[10] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990.

[11] PENMAN A D M, CHARLES J A. The influence of their interfaces on the behavior of clay cores in embankment dams [C]//Thirteenth International Congress on Large Dams, New Delhi, India [s. n.], 1979: 695-714.

[12] 张刚. 管涌现象微观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.

[13] 陆兆溱. 工程地质学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1989.

[14] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1980.

[15] 刘杰. 无黏性土层之间渗流接触冲刷机理实验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 27-30.

[16] SUNDBORG A. The river Klareilven study of pluvial processes [J]. Geografist, 1956, 38(2/3): 125-316.

[17] DUNE J S. Tractive resistance of cohesive channels [J]. J of Soil Mech and Foundation Division, ASCE, 1959, 85: 1-24.

[18] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils [J]. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 1965, 91: 105-139.

[19] 陈建生, 刘建刚, 焦月红. 接触冲刷发展过程模拟研究 [J]. 中国工程科学, 2003, 5(7): 33-39.

[20] ИСТОМИНА В С. Флвтриаднонная устойчивость грунтов [M]. Москва: Госстройиздат, 1957.

[21] 范德吞. 大颗粒材料的渗透性及其实际应用 [G]//渗流译文汇编. 南京: 南京水利科学研究所, 1963.

[22] 陶同康, 尤克敏. 无黏性土接触冲刷分析 [J]. 力学与实践, 1985, 7(1): 15-18.

[23] ГОЛБЪДИН А Л, РАССКАЗОВ Л Н. Проектирование грунтовых плотин [M]. Москва: Изд. АВС, 2001.

[24] 邓伟杰. 土石坝接触冲刷试验与分析研究 [D]. 南京: 河海大学, 2008.

[25] 刘建刚. 堤基渗透变形理论与渗漏探测方法研究 [D]. 南京: 河海大学, 2002.

(收稿日期: 2011-08-26 编辑: 周红梅)