

流土灾害的形成机理与治理

鞠 远 江

(中国矿业大学资源学院,江苏 徐州 221008)

摘 要:流土灾害是各类工程活动中经常遭遇到的与地下水有关的地质灾害之一。对于流土的防治方法,工程实践中进行了大量的研究,并成效显著。但在对流土机理认识以及流土类型划分等方面,尚缺乏统一意见,在防治方法的理论依据上也讨论不多。从基本概念入手,对工程中出现的流土灾害类型进行划分,并讨论其机理,总结描述流土的常规模型,并对流土耦合模型进行探讨,根据模型探讨流土防治方法的理论依据。

关键词:地质工程;渗透变形;流土;地下工程

中图分类号:P64.22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2007)02-0142-03

Formation Mechanism and Treatment to Flowing Soil

JU Yuan-jiang

(Resource Science Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract:Flowing soil is one of the most familiar kind disaster related to ground water during all kinds of engineering buildings. Lots of work about prevention and cure methods on flowing soil disaster has been studied during practices, and some kinds of methods had nice effects on flowing soil disaster controlling. But because there is still some different viewpoints on mechanism and taxonomy about flowing soil, few scholars talked over on the academic bases. The author starts with the essential conception of flowing soil, classifies the flowing soil disaster presenting to earthy engineering to different kinds and discusses the mechanisms respectively, summarizes the general model describing flowing soil and discusses the coupling model describing flowing soil, depending on the two kinds of models, discusses the academic bases of flowing soil disaster controlling.

Key words:geological engineering; permeating deformation; flowing soil; uderground engineering

1 流土相关概念

渗透变形:渗透水流作用于岩土上的力称渗透压力。当此力达到一定值时,岩土中一些颗粒甚至整体就会发生移动而被渗流带走,引起岩土体的结构变松,强度降低,甚至整体发生破坏,这种工程动力地质作用或现象称为渗透变形或渗透破坏。由于人类活动使渗流加强,往往导致危害严重的渗透变形发生,而且它不但在松散土体中发生,在基岩的断裂破碎带、软弱夹层和风化壳中也可能发生。

潜蚀和流土:渗透破坏有两种基本的形式,即潜蚀和流土。所谓潜蚀是指在渗透水流作用下,土中细颗粒在粗颗粒形成的孔隙通道中移动、流失的现象。所谓流土,是指在渗流作用下,一定范围的土体或颗粒同时与其他部分分开并沿渗流方向移动的现象。

值得注意的是,虽然潜蚀和流土是两种不同的渗透变形形式,但实际工程中,往往随着渗流的发展,潜蚀可以转变为流土。总体来说,潜蚀是渗透变形的初级形式,在这种情况下,只有土中粉砂及细砂等级的颗粒产生大幅度位移,土体结构一般不是突发性破坏,而可能表现为渐进式破坏或不破坏,大多数产生潜蚀的土体,其颗粒级配差,粒度累积曲线一般呈双峰型;流土是渗透变形的高级形式,其实质是在土体或岩体裂隙充填物中,某些部位土颗粒间的连结力减弱,当这些部位具有形成贯通面的趋势时,自由表面的一侧土体有可能达到极限平衡状态,并在渗

透压力作用下与另一部分分离,产生破坏^[1~4]。

潜蚀的发生,并不一定能够对工程产生危害,而流土现象或者说渗透变形的流土阶段,是实际工程中常见的破坏方式,因此有必要对其进行详细研究。

2 流土类型及形成机理

地下水在岩土体中的渗流会产生静水压力和动水压力。静水压力具有使岩土体裂隙发生扩展或颗粒间的连结力减弱的浮力效应。动水压力是指在地下水水头差的作用下,地下水沿岩体裂隙运动产生阻力,为克服阻力而产生的对裂(孔)隙壁及裂隙内充填物质的作用力。动水压力和静水压力综合作用使处在地下水位以下的岩土体具有产生张破坏或剪破坏的趋势。其中动水压力由于具有方向性,往往成为流土发生的触发力。

2.1 水利工程流土

水利工程中常见的流土灾害,主要发生在水库堤坝、河流大堤等拦水构筑物外侧。洪涝灾害是我国危害最大、造成损失最严重的自然灾害。而大量的洪灾资料表明,堤基与堤身渗流对河道堤坝破坏危害最大,其发生的数量多,分布范围广,且易诱发重大溃堤险情。目前,随着经济的发展,许多以土石坝为主的中、小型水电站、水库相继上马,而这些水电站、水库大多建基于第四纪未成岩土层或风化壳上。建坝以后坝上游和下游之间水头差显著增大,渗透力与水力

* 收稿日期:2006-04-09

作者简介:鞠远江(1975-),男,博士,中国矿业大学讲师,主要从事煤矿地质灾害研究。

梯度亦成正比增大，若防渗措施不当，往往会产生渗透变形甚至造成溃坝。

水利工程流土是流土现象中机理最简单的类型，本质是由于堤坝的修建使内外侧水头差增大，造成了渗透压力的增大而引起的。由于大多数堤坝流土发生在外侧坡角处，土体临空面基本向上，土体发生整体运动也只能是向上。判断这种流土发生的可能性，只要解决了土的浮容重和连结强度，就可以建立完整模型。实际水利工程中，发生流土的地段，往往土的连结力较弱或存在裂隙，因此只关心土的浮容重的大小。

2.2 基坑工程流土

高层建筑基坑工程是一个较为常见而且很特殊的工程，一般都具有周期长、施工难度大、安全储备低等特点，深基坑事故常常出现在软土地基上，这些地基的岩性多为粉细砂土、淤泥质粉土、淤泥质黏土等，各土层厚度不等且分布极不均匀，孔隙率大、结构疏松、处于欠固结状态、为高敏感性土层，因此事故发生率较高。在软土地区进行基坑开挖时，必须进行降排水，从而造成地下水径流路径的改变，产生基坑内外水头差。在高水头差的作用下易于出现渗透变形问题，当水头梯度（或渗透力）达到一定值以后，在无黏性土中即发生渗流逸出，土体表面隆起变形，同时发生土体流动，甚至出现“砂沸”现象。

基坑工程中的流土，主要发生在基坑底部及边角处，这些地方正是由于地下水渗流路径改变而产生较大水头差的点，可见基坑工程流土本质上也是人为改变水头差而引起渗透压力的增大，从而导致流土发生。这种情况与水利工程流土机理类似。

基坑工程中另外一种特殊性质的流土，称“基坑突涌”，这种流土发生位置在基坑底部，而基底为不透水层，即基坑底部存在承压水。由于基坑的开挖，承压水层上部土体重量消失，承压水上隔水层的应力平衡状态遭到破坏，在承压水头的作用下隔水层表面（基坑坑底）产生拉张应力，隔水层内部产生剪切应力，当这些力达到隔水层土体的临界强度时，隔水层被承压水头破坏，产生流土现象。此时，流土发生实际上相当于四边固定的板状岩土体的破坏问题^[5,6]。

2.3 地下工程流土

各种地下工程中，由于施工位置一般位于地下潜水位以下，工程的掘进必然破坏岩土体的应力环境与地下水排泄路径，在掘进扰动地应力的影响下，岩土体结构和应力状态改变，易于受地下水渗流影响产生流土。地下工程流土，由于临空面具有任意方向，流土也具有各种不同的初发方向。

由于地下工程位于地下的深度存在较大差异，其环境土体性质差异也很大。近地表进行的工程（如地铁隧道开挖等），土体结构偏于松散，固结程度相对较差，土体抗渗能力较差，流土较易发生。但由于土体松散且临近地表，处理技术比较简单，容易查明和控制地下水流动方向，对应力作出调整，从而使土体稳定。地下深处进行的工程（如矿山开采等），土体固结程度较好或已经成岩，抗渗能力强，理论上是流土灾害不易发生的环境。但由于随深度增加，土体内出现越来越大的自重应力，并具有一定的侧向应力，由于井、硐的开挖使其天然应力状态发生改变，在开挖部分附近存在明显的扰动，这样土体结构被破坏，变得松散，在合适的水文地质条件下，将产生流土。

处于岩体内的地下工程，在穿过含水岩层或导水断层时，受应力变化和地下水排泄路径变化等影响，往往在含水层或导水断层与掘进面交界处产生流土现象。

总之，地下工程流土的发生，与地应力具有密不可分的

关系，不可以简单套用水利工程或基坑工程流土的研究方法，对其发生发展过程应进一步进行研究^[7,8]。

3 流土模型

针对流土的形成机理，建立其物理模型和数学模型，为工程治理提供必要参数和设计依据，是研究流土的最终目的。在大量的工程实践中，研究者们对流土发生模型提出了多种形式，很好地解决了常见的流土灾害问题，但大多数模型都是对渗透压力和流土运动方向向上的情况进行研究，并没有考虑岩土体强度和应力的影响，称常规模型，在基坑突涌、地下工程流土中，由于应力和方向的差异，是不能直接运用常规模型的，必须对耦合模型进行进一步的研究。

3.1 常规模型

水利工程和基坑工程大多数情况下的流土，渗透压力和土体运动方向都是向上的，其形成机理如图 1，图中 D 是渗透压力，D₁ 和 D₂ 分别是渗透压力在垂直和水平两个方向的分量，G 为重力。此时，虽然含水层不同位置处受力方向有差异，但是流土的发生总是最先从位置“5”开始的，从图上可以看出来，该位置处的受力是处在一条直线上，方向相反的渗透压力与重力的合力（此种情况，对于土本身的抗剪强度是忽略的）。因此判断土体是否能够发生流土，关键是找出这两个力处于极限平衡状态时的相关参数。

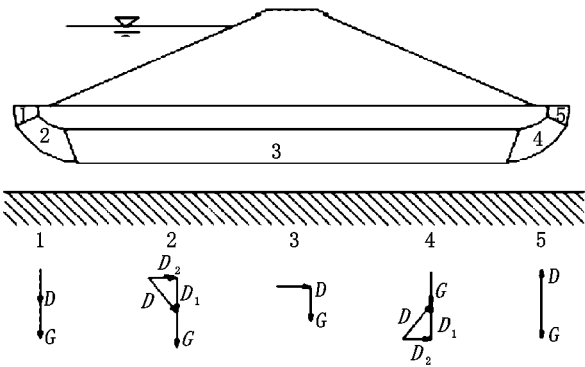


图 1 不同位置渗透压力与土的重力方向 (1)

图上看出，位置“5”处的土体处于极限平衡状态的条件是：

$$D = G \tag{1}$$

作用于单位土体上的渗透压力 (D) 可用下式表示：

$$D = \gamma_w J \tag{2}$$

式中：γ_w ——水的重度 (kN/m³)；J ——水力坡度。

可见，控制流土发生与否的关键参数包括：渗透水流的重量、水力坡度和土体重量。在三个参数中，往往假设水的重量和土体重量为定值，模型的意义就在于给出了判断流土发生危险程度的参数，即水力坡度^[1~4]。

3.2 耦合模型

地下工程流土及基坑突涌由于地应力和渗透压力方向的复杂性，至今仍没有成熟的模型，取最简单的底板位置进行研究。在煤矿工程地质研究中，底板稳定性问题与这类流土类似，在流土研究中可以借鉴这一模型。

地下工程所涉及到的岩土体透水性相对差，因此其发生流土灾害的关键是岩土体的强度是否能够承受住渗透压力及所有其他外力的综合作用而不破坏，此时应该以渗透压力为主要参数。以底板为例，此时的土体相当于一个四边被固定的由复杂岩土体组成的矩形板，考虑到开掘扰动和地应力影响，建立渗透压力 (P) 与相对隔水层厚度 (h) 关系的模型是抛物线形式：

$$P = ah^2 + bh - c \tag{3}$$

式中:

$$= 2 K_0 \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right)$$

$$b = r - w$$

$$c = Q$$

K_0 ——相对隔水岩土体最小抗张强度 (MPa); L_x 、 L_y ——地下工程空间的两个互相垂直方向的长度 (m); r 、 w ——是相对隔水岩土层和渗透水流的容重 (t/m^3); Q ——地应力和施工扰动应力的叠加效果 (MPa)。

该模型适用于基坑突涌和地下工程流土的临界状态判别,但在完全应用到地下工程流土研究时,没有把方向因素考虑在内,因此只对于底板问题是完全适用的,对于地下井硐的各个不同方向,应在公式左边乘以与角度相关的系数,同时系数“ b ”和长宽值也应根据角度调整,式中的应力效应值根据不同性质岩土体及地下工程形式、大小、开掘时间长短等都有变化,应以实测结合数值模拟确定^[8]。

4 流土治理方法

从流土的常规模型和耦合模型都可以看出,流土的发生与否,最关键的是渗透压力的大小以及所有抗渗因素的组合作用如何。因此,对于流土的防治也是从这两个方面来考虑的,以减小渗透压力、增加抗渗因素或两者结合的形式为主。

渗透压力的大小是水力坡度和渗透水流容重的乘积,为了减小渗透压力,可以减小水力坡度或渗透水流容重。与此

参考文献:

- [1] 杨裕云,杨红刚,吴有才.与地下水作用有关的地质灾害[J].水文地质工程地质,2004,(增刊):1-7.
- [2] 李广信,周晓杰.土的渗透破坏及其工程问题[J].工程勘察,2004,(5):10-13.
- [3] 何永红,王建明,李粉灵.粗粒土渗透变形机制浅析[J].西北水电,2002,(2):44-46.
- [4] 唐益群,施伟华,张先林.关于流土和管涌的试验研究和理论分析[J].上海地质,2003,(1):25-31.
- [5] 潘宝国,朱锁成,郑必勇.基坑流土现象实例分析与处理[J].西部探矿工程,2004,(9):41-42.
- [6] 杨锦东.深基坑中的渗透变形和防治[J].广东建材,2004,(8):59-60.
- [7] 许宝田,阎长虹,李小昭.隧道开挖过程中的渗透变形问题分析——结合南京地区工程实例[J].水文地质工程地质,2002,(2):45-48.
- [8] 葛亮涛,叶贵钧,高洪烈.中国煤田水文地质学[M].北京:煤炭工业出版社,2001.281-323.
- [9] 李柱和,祝树红,顾雪明.防渗堵漏技术在煤矿建设中的应用[J].建井技术,2000,21(1):18-20.
- [10] 姚源道,刘忠义.地下工程堵漏技术[J].建筑技术,1994,21(4):231-234.
- [11] 隋旺华,李永涛,李贵田,等.煤矿立井微孔隙岩体注浆防渗及机理分析[J].岩土工程学报,2000,22(2):214-217.
- [12] 浦玉炳,吴立人.土工织物在航道堤坝地基防渗工程中的应用[J].水运工程,2002,(8):58-59.
- [13] 葛中华.土体裂缝注浆防渗的临界水力梯度及其防渗机理[J].南京大学学报(自然科学),1997,33,(4):571-579.
- [14] 钱玉林.筑堤土防渗性状试验研究[J].岩土力学,2004,25(5):824-826.
- [15] 钱玉林,严斌,胡唐伯.渗透变形的防治及其工程应用[J].土工基础,2001,15(1):57-60.

(上接第 141 页)

的主要措施是加强工程对环境影响的监测,在多年冻土区设置气温、地温和活动层监测点,进行长期监测。

参考文献:

- [1] 吴青柏,施斌,刘永智.青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J].中国科学,D辑,2002,32(6):514-520.
- [2] 刘永智,朱元林,吴青柏.青藏高原多年冻土顶板温度和温度位移预报模型的应用[J].冰川冻土,2002,24(5):614-617.
- [3] 刘永智,朱元林,吴青柏.人类工程活动下多年冻土热融蚀敏感性评价模型[J].岩土工程学报,2001,23(6):659-663.
- [4] 王绍令.试论青藏高原多年冻土类型的划分[J].干旱区地理,1997,20(3):56.
- [5] 吴紫汪,程国栋,朱林楠,等.冻土路基工程[M].兰州:兰州大学出版社,1988.111.
- [6] 李树德.青藏公路沿线多年冻土的温度和厚度[A].中国地理学会冰川冻土学术会议论文集(冻土学)[M].北京:科学出版社,1982.7.
- [7] 谢应钦.青藏高原多年冻土发育的温度条件[A].见:中国地理学会冰川冻土学术会议论文集(冻土学)[M].北京:科学出版社,1982.1-6.
- [8] 王家澄,等.青藏公路沿线的多年冻土[J].地理学报,1979,34(1):18.
- [9] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.1,115,128,148,301,309.

相关的常见方法主要包括导渗排水减压和堵截渗流路径法。其实质是在易发生流土破坏的地段沿渗透水流的上方向进行导流减压或截断渗流通道,从而起到减小局部水力坡度的作用,同时,水力坡度的减小,使得潜蚀不易发生,地下水容重不致增大过多,也是减小渗透水流容重的方法。

从两种形式的模型可以看出,流土形成过程中的抗渗因素包括:岩土体自重、岩土体的强度、相对隔水岩土体的厚度等。实践中往往通过上部压重的方法来进行水利工程流土的抢险,实际上是通过增加上部岩土体自重来增加抗渗能力的。土的强度往往受制于裂隙的发育程度和松散程度,注浆加固法,加大了颗粒间粘结力的大小,并且对裂隙起到封堵作用,同时增加了相对隔水岩土体的厚度,因此是工程中常用的防治地下工程流土的方法^[9~15]。

5 结 论

将渗透变形分为潜蚀和流土两种;对不同工程中流土的特点和形成机理进行了讨论,认为水利工程流土是最简单类型的流土,地下工程流土涉及的因素最全面;总结了描述流土发生条件的常规模型,对于地下工程流土的适用模型进行了探讨,参考煤矿底板稳定性问题的研究成果,给出了地下工程流土极限条件模型的基本形式,并对其在地下工程流土中的应用问题指出了参数修改方向;结合流土机理及其模型,对流土防治方法进行了总结。