

雨水入渗与膨胀性土边坡稳定性试验研究

徐光明, 王国利, 顾行文, 曾友金

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 采用离心模型试验方法, 完成了 2 组不同坡度的膨胀性土开挖边坡土工离心模型试验, 比较了边坡坡度大小对其稳定性的影响, 并尝试通过控制注水浸泡时间来模拟短期和长期的雨水入渗, 从而再现了降雨条件下膨胀性土开挖边坡的破坏特征和破坏机制。结果分析表明膨胀性开挖边坡表层土体因雨水入渗膨胀软化, 强度降低, 严重削弱了边坡稳定性; 鉴于膨胀性土路堑在雨水入渗后发生浅层滑动破坏, 因此, 单纯放缓边坡坡度并不是防治这种破坏的最有效措施, 重要的是做好隔水防水等处治工作。

关键词: 膨胀性土; 含水率; 开挖边坡; 雨水入渗; 破坏机制

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0270-04

作者简介: 徐光明(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事土工离心模型试验、土坡稳定性、港口工程结构物与土共同作用等方面的研究。

Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration

XU Guang-ming, WANG Guo-li, GU Xing-wen, ZENG You-jin

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstracts: Two centrifuge models were carried out in which effects of short-term and long-term infiltration of rain water were simulated by infilling water to soak the toe of expansive soil slopes with different slope inclinations. The model slopes were then brought to failure so that the process of sliding was observed and the features of failure were intensively characterized. It was shown that the domain of sliding was closely related to the increase in water content within that area caused by infiltration. In this way, it was very important to take measure to prevent increase of water content in that area near the slope toe of to soften expansive soil due to infiltration of rain water.

Key words: expansive soil; water content; excavated slope; infiltration of rain water; failure mechanism

0 前言

膨胀性土公路路堑在雨季屡受到损毁, 严重影响了公路的安全畅通。根据报道, 在降雨期间发生膨胀土路堑失稳坍塌破坏已经成为一种严重的公路安全病害^[1]。另外在公路施工实践中发现, 一些新开挖的坡度很缓的膨胀性土路堑, 在降雨期间也同样发生了失稳破坏。

高速公路路基和路堑一般位于地下水位以上, 土体处于非饱和状态, 因此其含水率和饱和度随外部天气条件变化在不断变化, 这种变化会影响到其稳定性, 而这种影响在膨胀性土开挖边坡中尤为明显。笔者结合西部膨胀性土地区公路建设研究工作, 采用土工离心模型试验对膨胀土开挖边坡的稳定性开展了 2 组不同坡度的模型试验, 并尝试通过积水浸泡方法模拟了雨水入渗, 初步研究了雨水入渗对膨胀性土边坡稳定性的影响。

1 模型试验结果和分析

2 组边坡稳定性模型试验是在南京水利科学研究院的 NHRI-89 型土工离心机上完成的。模型布置及雨水入渗模拟装置见图 1。其它有关模型量纲分析、试验设计和量测介绍可参见文献[2]。

试验采用的膨胀性土颜色偏白, 自由膨胀率 60.0%, 其它特性见表 1。模型开挖边坡制备程序如下: 根据取样现场天然膨胀性土的密度和含水率, 相应地确定模型土体的干密度和含水率; 在模型箱内分层压实制备膨胀性土块状试样; 将土样置于离心机, 在 100 g 的超重力场中压密均匀; 之后按照一定坡度切削成边坡。这样制备的 2 组模型 GSMS1 和 GSMS2, 土体含水率为 33%, 干密度为 1.33 Mg/m³, 边坡高度 160 mm, 坡趾以下地基土层厚度 160 mm, 坡度则分别为 1:1.1 和 1:2.0 (表 2)。

表 1 模型土料物理力学特性指标

比重 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	塑性指数 I_P /%	颗粒分析粒径/mm		
				2~0.075	0.075~0.005	<0.005
2.74	72.0	28.8	43.2	10.4	32.6	57.0

表 2 模型边坡参数

模型序号	坡高 h_m /mm	坡比 $\tan\beta$	含水率 w_m /%	干密度 $\rho_{d,m}$ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和度 S_r	积水深度 $h_{\max,m}$ /m	浸泡历时 $t_{w,p}$ /d
GSMS1	160	1:1.1	33.0	1.33	0.85	0.56	230
GSMS2	160	1:2.0	33.0	1.33	0.85	0.39	100

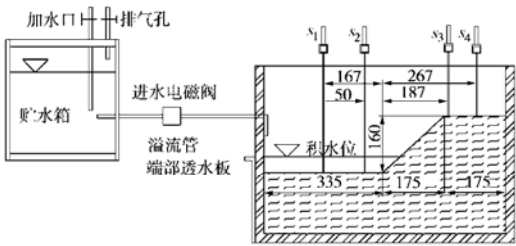


图 1 雨水入渗模拟装置和模型布置 (GSMS1)

Fig. 1 Model setup (GSMS1) with a simulation device for infiltration of rain water

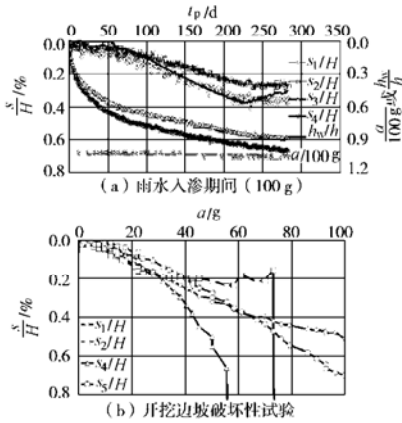


图 2 模型 GSMS1

Fig. 2 Settlement responses (GSMS1)

1.1 雨水入渗与膨胀性土开挖边坡的稳定破坏性状

模型边坡 GSMS1 剖面如图 1 所示, 该模型被置于离心机后, 逐级提高其所承受的离心加速度至 100g, 随后进行采用注水浸泡模拟雨水入渗。图 2(a) 给出了在 100g 条件下模型表面沉降和积水深度随时间 (按原型时间尺度) 发展过程曲线。从图中可以发现: 在注水浸泡前 (原型边坡开挖 60 d 后), 位于坡前坦地的两个测点 (s_1 和 s_2) 的相对沉降均很小, 不足 0.1%; 位于坡顶的两个测点 (s_4 和 s_5) 相对沉降量已分别达到了 0.37% 和 0.45%。

在路堑开挖 60 d 后, 即开始模拟雨水入渗最恶劣的情形——排水不畅, 坡前形成积水的情形, 模型积

水最大深度达 90 mm。坡前形成积水后, s_1 和 s_2 测点的沉降反应显著, 沉降量随着积水深度的增加而不断增加, 当积水深度达到最大值时, 沉降量也同时达到最大, s_1/h 和 s_2/h 分别约为 0.38% 和 0.27%; 当积水渐渐排出, 水深慢慢减小后, 沉降读数减小, 即显示坡趾处出现少量隆起, 表明此处土体已为积水浸泡而软化, 边坡局部稳定性受到一定的削弱。然而从坡顶两测点的沉降表现看, 表明边坡大部分土体此时尚未受到坡前积水浸泡的影响。停机后检查发现, 模型剖面位移变形网格未见明显的侧向位移, 仅仅是水位线以下的坡前坦地和靠近坡趾的坡面表层出现了泡软褶皱现象。

该模型坡前保持 55 mm 左右积水静置 2 d, 让水继续向更深层的土体内入渗, 模拟现场较长时间的雨水入渗。再次升高离心加速度测定此时土坡的临界稳定高度^[3], 并观察膨胀性土开挖边坡的破坏模式。位移传感器的反应如图 2 (b) 所示, 当升至 50.2 g, 坡顶处的 s_4 的沉降读数骤增; 坡趾近处的 s_2 位移读数开始减小, 即坡趾前土体隆起。据此可判定, 50.2 g 是边坡从稳定到破坏的转折点, 对应的原型临界稳定高度为 8.0 m。与短期雨水入渗条件下的边坡临界稳定高度 (>15.5 m) 相比, 这一高度表明积水浸泡时间越长, 稳定性削弱越明显。同时, 从闭路电视监测到坍塌滑动是由坡趾逐渐向上发展, 范围逐步增大, 所形成坍塌土体向坡前坦地大幅度推移, 整个破坏过程短暂而具有突发性, 最终形成了如图 3(a) 所显示的破坏形态, 显然, 这是一种逐级牵引式渐进破坏形态。

从图 3(a) 可以看到, 滑动体的轮廓线明显, 滑动体以外的土体无明显沉降和侧向变位, 滑动体与稳定体两部分无明显过渡带; 滑裂面呈折线; 滑动体由边坡浅表层厚约 48 mm (相当于原型约 2.4 m) 范围内的土体所构成, 显然这是一种典型的浅层破坏。

从图 3(b) 可以发现, 坡前坦地深度约 32 mm (相当于原型约 1.4 m) 和坡体厚约 50 mm (原型约 2.1 m) 范围内土体含水率均在 40% 以上, 与制模时的 33% 初

始含水率相比, 浅表层土体的含水率增高明显, 最大增幅达 11%, 往下较深部位的含水率变化较小, 并逐渐过渡到制模时的初始含水率。对照图 3(a)和(b)可以看出, 40%含水率等值线以上土层厚度与边坡滑动体的厚度大体相同, 表明边坡浅层破坏与雨水入渗引起的含水率增加直接相关。

从图 3(c) 还可以看出, 浅表层土体软化后形成了低强度区(不排水剪强度 s_u 小于 15 kPa), 厚度约为 54 mm (相当于原型约 2.3 m)。比较这一区域范围(图 3(c))与含水率有明显变化的区域范围(图 3(b)), 发现它们形状大体一致, 厚度也相当接近。而其它区域因与坡前积水区域相距较远, 强度衰减相对不很明显。可见, 含水率增加直接导致膨胀性土开挖边坡的强度衰减。

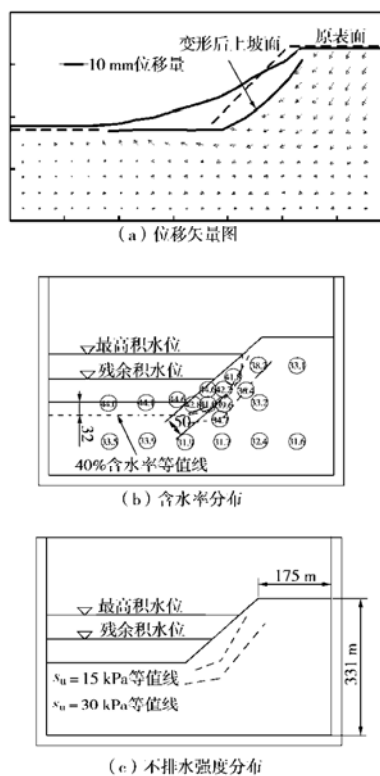


图 3 模型 GSMS1

Fig. 3 Distributions of water contents and strengths in model (GSMS1)

1.2 坡度大小对开挖边坡稳定性的影响

为了探讨坡度大小对膨胀性土开挖边坡稳定性的影响, 在模型 GSMS1 的试验基础上, 开展了一组坡度较缓(坡比为 1:2.0)开挖边坡模型 GSMS2 的试验。在 100 g 运转条件下边坡受短期雨水入渗的沉降性状与模型 GSMS1 大体相同。

之后在模型中保留约 12 mm 深的积水静置 2 d,

模拟现场较长时间的雨水入渗。再次逐级升高离心加速度, 测得边坡破坏时加速度为 60 g, 换算成临界稳定高度是 9.6 m。边坡破坏特征与前一组模型类似, 滑动范围厚约 49 mm (图 4(a)); 坡前坦地和坡趾以上最高积水位以下厚度 40~43 mm 浅表层土体内, 含水率增幅明显(图 4(b)), 约 8~9%; 浅表厚约 47 mm 土层强度明显低于未受浸水影响区域土体的强度(图 4(c))。

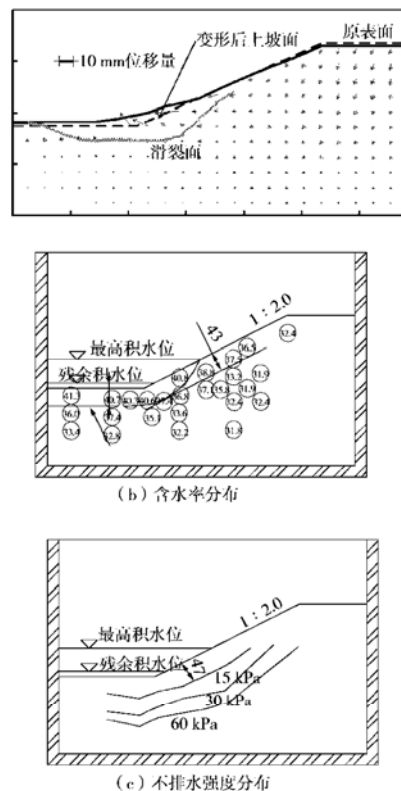


图 4 模型 GSMS2

Fig. 4 Test results (GSMS2)

缓坡开挖边坡模型 GSMS2 试验结果表明, 减缓开挖坡度, 虽能使临界稳定高度有所增加, 但不能完全有效防治膨胀性土开挖边坡中因雨水入渗引发的这种浅层失稳破坏。抵御这种破坏的关键之一就是要避免坡趾处为积水浸泡而发生膨胀软化, 以阻止软化对整个边坡稳定性所造成的削弱。这样看来, 加强路堑工程排水设施的设计、施工和维护保养, 确保足够排水能力, 是一项十分关键的措施。其次, 对路堑坡趾重点部位进行必要的防水、隔水和加固处治, 同样十分重要。

2 结 论

通过控制注水浸泡时间, 近似模拟了短期和长期

雨水入渗, 所完成的2组不同坡度的膨胀性土边坡稳定性土工离心模型试验结果表明。

(1) 在短期雨水入渗条件下, 膨胀性土开挖边坡土体侧向位移不明显, 稳定性削弱不显著。在长时间的雨水入渗条件下, 浅表层土体膨胀软化, 强度降低, 临界坡高明显减小。所发生的滑动是一种逐级牵引式渐进破坏, 即坍塌由坡趾处向上发展, 范围逐步扩大, 整个过程短暂而具有突发性。滑动体轮廓明显, 滑裂面呈折线, 滑动面以下的土体无明显沉降或侧向变位; 从坍塌厚度看(2.5 m左右)滑动为浅层破坏。开挖边坡的失稳机制在于雨水入渗引发一定厚度内土体膨胀软化而强度降低, 而坡趾处土体强度的明显降低对边坡稳定性削弱最为严重。

(2) 放缓路堑开挖坡度而不作其它表层隔水防水加固处理, 将不能有效防止因长期雨水入渗致使坡趾软化所引发的这种膨胀性土边坡失稳坍塌破坏。

(3) 鉴于非饱和膨胀性土路堑边坡受雨水入渗而发生的滑动破坏范围主要局限在浅表层, 因此这一区域也就成为边坡加固处理的重点区域, 而做好坡趾部

位防水隔水工作最为关键。

参考文献:

- [1] 黄晓明, 张晓冰. 公路建设质量通病分析与防止[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.(WANG X M, X B ZHANG. Analyses and prevention of quality defects in highway construction [M]. Beijing: China Communication Press, 2002.)
- [2] 徐光明, 王国利, 顾行文. 雨水入渗与膨胀性土边坡稳定性试验研究[C]//第二届全国非饱和土学术研讨会论文集. 杭州, 2005, 606 - 613. (XU G M, WANG G L, GU X W. Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration [C]// Proceedings of the 2nd Chinese National Symposium on Unsaturated Soils. Hangzhou, 2005, 606 - 613.)
- [3] TAMATE T, TAKAHASHI A. Slope stability test [C]// Proceedings of International Conference on Centrifuge. Rotterdam: A A Balkema, 1998, 1077 - 1086.

2006年度黄文熙讲座学术报告会在南京举行

2006年1月10日, 2006年度黄文熙讲座学术报告会在南京水利科学研究院国际会议厅隆重举行, 来自全国各大学、科研院所和设计院等单位的岩土工程专家、学者和研究生200多人参加了会议。本次黄文熙讲座学术报告会由南京水利科学研究院承办。报告会举行了简短的开幕式, 南京水利科学研究院副院长陈生水教授致开幕辞, 中国水利学会岩土力学专业委员会主任委员邴能惠教授、中国土木工程学会土力学与岩土工程分会副理事长李广信教授、中国科学院陈祖煜院士和《岩土工程学报》副主编张宏宇教授在主席台就坐, 并先后发言。开幕式上陈祖煜院士宣读了《岩土工程学报》编委会主任沈珠江院士和副主任张在明院士热情洋溢的联名贺信。开幕式由南京水利科学研究院岩土工程研究所所长蔡正银教授主持。

2006年度黄文熙讲座为第九讲, 主讲人为清华大学李广信教授, 讲座题目为“土的清华弹塑性模型及其发展”。本讲首次举办讲座学术报告会。

黄文熙讲座由《岩土工程学报》主办, 是有关岩土工程方面学术水平最高的全国性讲座, 创办于1998年, 每年开一讲, 前八讲的主讲人先后分别为: 沈珠江院士、周镜院士、方晓阳教授、谢定义教授、黄熙龄院士和陈祖煜院士、郑颖人院士、包承纲教授、汪闻韶院士和张在明院士。

主讲报告之后, 宰金珉教授、殷宗泽教授、蔡正银教授、黄茂松教授、张建民教授和陈铁林博士先后作了相关主题的专题报告。

(本刊编辑部)