

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.02.005

水平成层土质边坡破坏机理研究

黄小龙, 王志斌, 姚亮, 胡锡鹏

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对水平成层土质边坡的成层特性, 建立室内模型试验模拟其承载特性以及破坏机理, 运用FLAC^{3D}数值模拟技术与室内模型试验相互验证分析, 得到了层状边坡在坡顶加载情况下的荷载-位移规律、极限承载力、滑动面形态和位置。研究表明, 极限承载力随分层厚度的增大而增大, 而边坡高度对极限承载力的影响甚微。再运用FLAC^{3D}数值模拟技术进行拓展分析, 利用成层土坡与均质土坡破坏机理的联系得到了成层土坡剪出高度与加载宽度以及坡比的关系, 同时得到了水平成层土坡不同破坏模式的临界坡比, 所得结果对实际工程具有一定的参考意义。

关键词: 岩土工程; 水平成层土质边坡; 破坏机理; 极限承载力; 剪出高度

中图分类号: TU449

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)02-0026-05

Mechanism of Horizontal Layered Soil Slope Failure

Huang Xiaolong, Wang Zhibin, Yao Liang, Hu Xipeng

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: For horizontal layered soil slope into a layer characteristics, establishes model tests to simulate the bearing characteristics and failure mechanism. By means of the mutual verification analysis of FLAC^{3D} numerical simulation and indoor model tests, gets load - displacement law, ultimate bearing capacity and the sliding surface shape and position under the top loading of layered slope. The results show that the ultimate bearing capacity increases with the layer thickness increment, and the influence of slope height to the ultimate bearing capacity is minimal. Applies FLAC^{3D} for expand analysis and uses the contact of failure mechanism between layered slope and homogeneous slope to obtain the relationship between layered slope cut height with load width and slope ratio, meanwhile obtains the critical slope ratio in different failure modes. The results have certain reference significance to the actual project.

Keywords: geotechnical engineering; horizontal layered soil slope; failure mechanism; ultimate bearing capacity; cut height

0 引言

随着国民经济的飞速发展, 我国的土木工程建设也随之高速发展, 如铁路、高速公路、水电水利设施、民用建筑的建设方兴未艾。伴随着工程的建设, 各种开挖和堆填的边坡越来越多, 高度与复杂性越

来越大。例如北京至福州高速公路中福建段 200 多公里内高度大于 40 m 的边坡有 180 多处; 宝成铁路中陕西省宝鸡到四川省绵阳区段, 大部分地区为深山峡谷, 山坡陡立, 河道蜿蜒, 自然斜坡一般均接近其临界坡度, 稳定性都较差, 据统计, 仅这段铁路中开挖的边坡数量达 293 处, 累计长度有 79.7 km。

收稿日期: 2015-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208523)

作者简介: 黄小龙(1990-), 男, 湖南湘潭人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土与地下工程,

E-mail: 283854103@qq.com

在实际工程建设中,水平成层边坡是一种常见的工程现象^[1-2],例如填方路堤边坡^[3]、全风化沉积岩边坡^[4]等,所涉及的边坡几近于水平成层。为了研究该类特殊边坡的破坏模式及其工作性状^[5-6],本课题组采用室内试验的方法进行模拟试验,通过数值模拟分析与室内模型相互验证,对水平层状土质边坡进行拓展研究。

1 室内模型试验

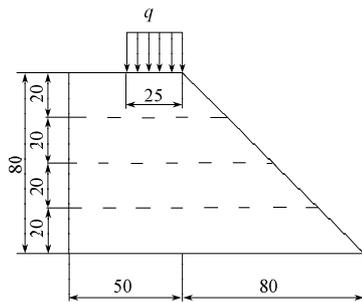
采用室内小型模型箱模拟水平层状土质边坡在外荷载作用下的工作性状、承载特性以及破坏机理。模型箱尺寸为220 cm × 167 cm × 220 cm。试验过程主要包括:模型制作、模型加载、模型开挖。

1.1 试验方案设计

根据试验目的以及试验的可行性与有效性,结合实验室现有条件和设备,将本次试验分为5个方案,坡比均为1:1,坡面无约束,模型箱底面、左右侧面、后挡板均采用大刚度钢板焊接,视作无变形体。各方案模型尺寸如表1所示,图1是以A-1方案为例的模型填筑示意图(虚线部分表示软弱土层)。

表1 试验模型几何尺寸

试验方案	填土高度/cm	土层数	层厚/cm
A-1	80.00	4	20.00
A-2	80.00	5	16.00
A-3	80.00	3	26.60
B-1	100.00	5	20.00
B-2	60.00	3	20.00



注:图中数据单位为cm。

图1 A-1试验方案示意图

Fig. 1 A-1 test program schematic

1.2 试验过程

在模型试验之前,首先对试验所用的填筑土体以及层间材料进行室内常规土工试验,主要包括:含水率试验、土粒比重试验、液塑限试验、击实试验、三轴压缩试验,以及在后期模型破坏试验中的压实度检测试验、快剪试验和固结试验。试验得到的填土及层间土基本参数如表2所示。由于模型填筑过程

中存在水分蒸发,按高于击实试验^[7]所确定的最佳含水率(20.2%)1%~2%的含水率对土样进行拌合。将拌合好的土样按照各方案设计尺寸进行分层填筑,按照90.2%的压实度对土体进行压实,利用模版形成坡面。在模型填筑压实完毕后,对坡面进行平整度测试,测试结果满足要求后开始安装加载装置以及测量装置。采用20 t千斤顶和模型箱上部反力梁来施加荷载,采用20 t压力传感器来控制加载力的大小,采用量程为50 mm的百分表测量坡顶沉降和坡面位移。图2为A-1方案百分表布置图,其余方案类似。

表2 土样物理力学参数

液限/%	塑限/%	最佳含水率/%	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa
44.83	24.96	20.2	16.95	6.3

黏聚力/内摩擦		层间接触面	
kPa	角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
34.43	27.36	28.31	26.58

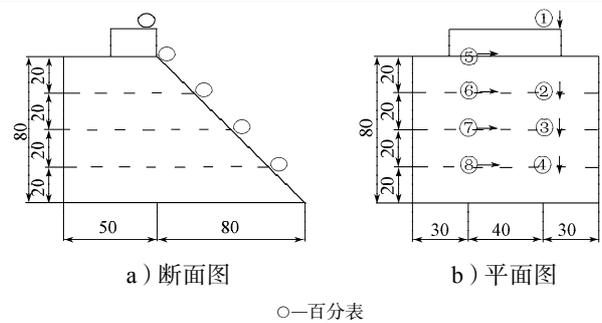


图2 方案A-1百分表布置图

Fig. 2 Layout of dial indicator for scheme A-1

在模型填筑完毕,测量装置安装就位之后,将模型静置2 d,使模型内部土体达到初始应力平衡,并且记录初始平衡状态的仪器读数作为初始值;接下来开始加载,初期加载等级^[8]为5 kN(约33 kPa),破坏期为1 kN(约7 kPa)。当边坡开始出现比较明显的裂缝时,降低加载等级,加大观测频率。至无法施加更大荷载时停止加载。待模型破坏之后,拆除加载及测量装置,将模型对半开挖,观察其破坏面,并且拍照记录。加载装置和测试设备安装如图3所示。



图3 模型试验加载装置和测试设备

Fig. 3 Loading equipment and testing equipment for model experiments

2 试验结果分析

模型试验完成之后，将各试验方案得到的位移、沉降数据整理得到荷载-位移曲线，用计算机对破坏面进行拟合。

2.1 荷载-坡顶沉降

图4为5组试验坡顶沉降随荷载变化的曲线。由图可以看出，5组曲线变化趋势基本相同，在施加荷载的过程中，以2个界限荷载将边坡位移特征区分为3个阶段，即压密变形阶段、局部剪切阶段和整体破坏阶段。通过对比5组方案的位移-荷载曲线发现，土层厚度越大，边坡极限承载力越高，反之则承载力越低；而在坡率、加载方式及分层厚度相同的情况下，边坡高度对极限承载力的影响不明显。

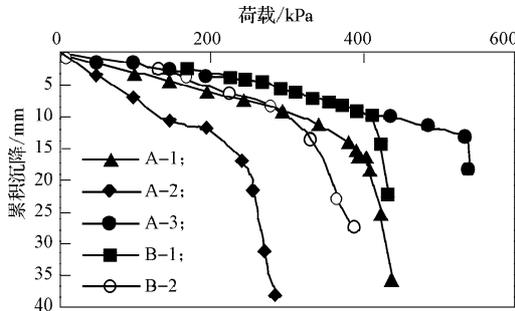


图4 各试验方案顶面荷载-坡顶沉降变化曲线

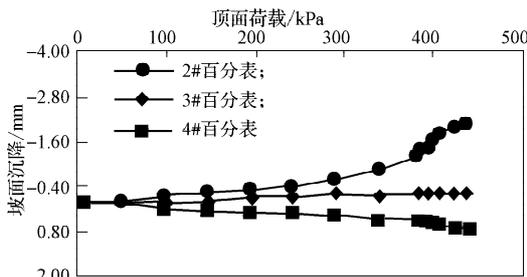
Fig. 4 The variation curves of top load-top settlement for all experiment schemes

2.2 荷载-坡面位移

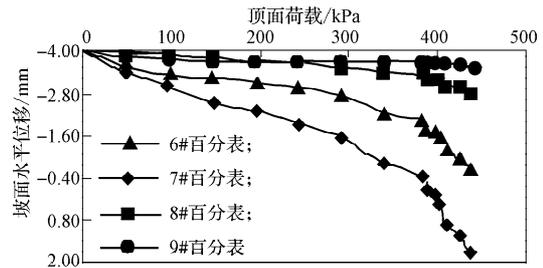
图5为方案A-1各百分表荷载-位移变化曲线，其中图5a为坡面沉降与施加荷载的关系曲线，图中2#、3#、4#百分表距坡顶的高度分别为20、40、60cm；图5b为坡面水平位移与荷载的关系曲线，图中6#、7#、8#、9#百分表距坡顶的高度分别为20、40、60、80cm。

由图5a可知，2#百分表坡面沉降随荷载的增加而呈负增长趋势，3#百分表曲线基本保持水平，4#百分表沉降值随荷载增加有增大的趋势，可见当边坡破坏时，局部破坏主要发生在距离坡顶0~40cm范围内。

由图5b可知，4条曲线变化趋势基本相同，只是变化幅值相差较大，其中7#百分表变化幅度最大，6#、8#、9#百分表幅度依次减小，7#百分表位置恰好处于滑动面剪出位置。



a) 坡面沉降



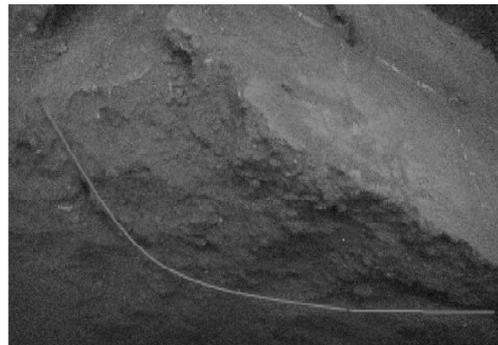
b) 坡面水平位移

图5 方案A-1荷载-位移变化曲线

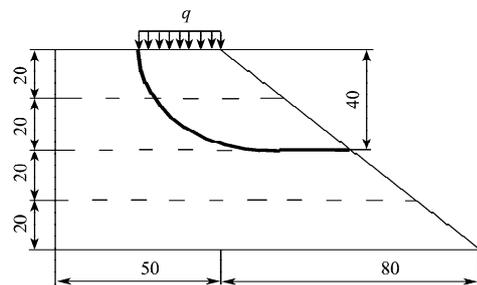
Fig. 5 The variation curve of load-displacement for scheme A-1

2.3 破坏面形态与位置

将破坏后的模型对半开挖，结合对试验过程以及试验数据的观察与分析，滑动面首先在坡顶加载板后缘附近出现，随着荷载的增大，滑动面逐渐以圆弧的形式向边坡内部延伸，延伸至分层面位置时，开始沿分层面滑动，直至从坡面剪出，边坡发生局部破坏。滑动面整体形态为圆弧滑动面与直线段的组合型滑动面。以A-1试验方案为例，滑动面整体形态如图6所示。



a) 模型破坏面



b) 滑动面拟合图

图6 方案A-1模型滑动面图

Fig. 6 Model sliding surface of A-1 scheme

通过对比分析5组方案的滑动面，发现在坡比一定时，边坡剪出高度（剪出面距坡顶的距离）主要与坡顶加载的方式（如加载梁的刚度、宽度、位置）以及边坡分层厚度相关。A-3模型尽管剪出位置高于其它模型，但其滑动面的圆弧曲面曲率更大，平面段更长。几组模型剪出位置如表3所示。

表3 各试验方案滑动面剪出位置

Table 3 The shear positions of sliding surface for each scheme

试验方案	剪出面位置 (距坡顶)/cm	试验方案	剪出面位置 (距坡顶)/cm
A-1	40.00	B-1	40.00
A-2	32.00	B-2	40.00
A-3	26.60		

3 数值模拟分析

3.1 概述

FLAC^{3D} 基本原理是采用有限差分中的拉格朗日连续介质法。对于高边坡失稳而言,该方法能够跟踪高边坡中任一点的历史,分析影响高边坡失稳的主导因素。利用FLAC^{3D} 解决实际问题,主要有模型建立与计算求解2个步骤。模型建立主要包括:设计模型尺寸、划分网格、设定材料参数、设置边界条件等。计算主要采用强度折减法,以滑体由静止状态变为运动状态以及产生较大塑性变形且变形值不为定值作为边坡失稳判据。

本文在采用FLAC^{3D} 中的强度折减法求解时,将岩土体假设为理想的弹塑性材料,本构模型采用Mohr-Coulomb准则,土样物理力学参数如表2所示。

3.2 加载宽度对剪出位置的影响

图7为A-1方案以及均质土坡剪出位置与加载宽度的关系。

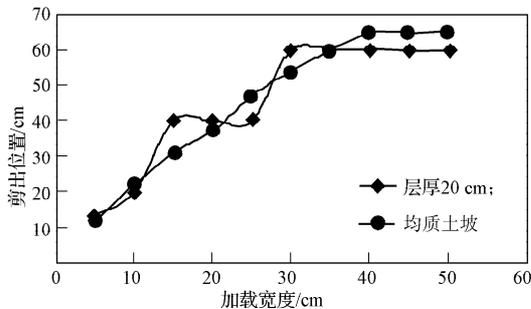


图7 层状边坡剪出位置与加载宽度的关系

Fig.7 Relationship of load width and cut-out position of layered slope

由图7中层厚为20 cm时的曲线可知,对于水平成层土质边坡,其滑动面与坡面交点距离坡顶的距离与加载宽度的关系曲线主要呈阶梯型上升趋势。

由室内模型试验以及数值模拟分析可知,水平成层在坡比为1:1时,其破坏方式为圆弧+直线型破坏,其剪出位置与均质土坡剪出位置存在联系。当均质土坡与水平成层边坡具有相同几何形态及相同土力学性质时(软弱夹层除外),假设作用于2种边坡坡顶的均布荷载宽度相同。运用前面得到的均质土坡剪出位置与加载宽度之间的关系曲线,可以得到均质土坡的剪出位置。将均质土坡的滑动面与坡

面交点位置映射至水平成层边坡坡面上,当该点恰好位于软弱夹层位置时,剪出位置为该点位置;当该点位于2个软弱夹层之间的坡面上时,如果该点距上层软弱夹层距离小于距下层软弱夹层距离,则滑动面沿上层软弱夹层剪出,反之则沿下层软弱夹层剪出。

根据上述关系结合均质土坡滑出位置与加载宽度关系的拟合方程,对水平成层土坡滑动面和坡面的交点距坡顶的垂直距离与加载宽度之间关系的方程为

$$y = \begin{cases} n \cdot h, & H - n \cdot h < h/2; \\ (n+1) \cdot h, & H - n \cdot h \geq h/2; \\ H, & H \leq h; \end{cases}$$

式中: y 为滑动面与坡面交点距坡顶的垂直距离;

H 为均质土坡在坡顶加载宽度为 x 时的剪出高度, $H = 2004x^4 - 6251x^3 + 7057x^2 - 3381x + 637.7$;

h 为成层土坡分层厚度;

n 为 H/h 的最大整数解。

3.3 不同坡比对滑出位置的影响

由室内模型试验以及数值模拟分析可知,在保持加载范围不变,层厚不变的情况下,不同的坡比对滑出位置的影响较明显。方案A-1剪出高度跟坡比的关系如图8所示;坡比为2:1和2:3时,剪出高度与加载宽度的关系对比曲线如图9所示。

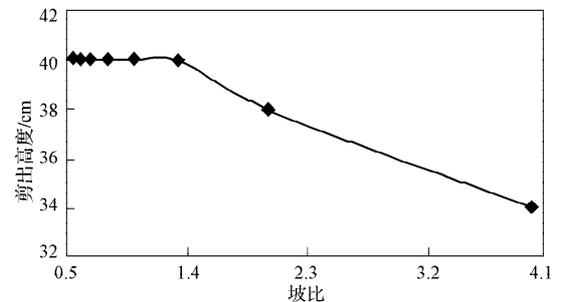


图8 剪出高度与坡比的关系

Fig. 8 The relationship of slope ratio and cut height

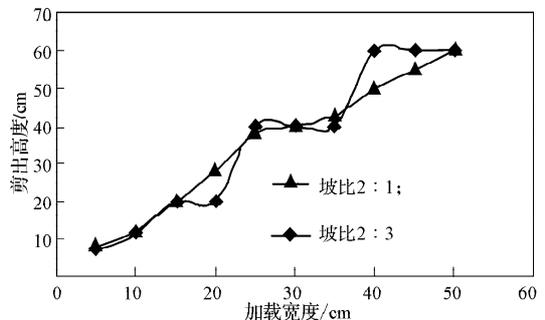


图9 不同坡比下剪出高度与加载宽度的关系对比

Fig. 9 The relationship of height cut and load width for different slope ratios

由图8可知,当坡比小于1.4时,滑动面均从第二个夹层剪出(即距坡顶40 cm处),当坡比大于1.4时,滑动面则沿两软弱夹层之间的均质土层剪出。通过图

9 对比坡比为 2:1 和 2:3 的层状边坡在不同加载宽度作用下滑出位置的曲线, 结合上述分析可知, 当层状边坡坡比越大时(边坡越陡峭), 水平层状边坡的剪出高度与加载宽度的“阶梯式”关系越不明显, 其破坏面受软弱夹层的影响越小, 其破坏机理与均质土坡破坏机理较相似(如图 10)。当坡比越小(边坡越平缓), 水平层状边坡的破坏面受软弱夹层的影响越大, 甚至同时沿 2 条软弱夹层滑出破坏(如图 11)。通过多组室内模型试验以及数值模拟分析可知, 层状边坡在改变坡比时, 同样具有一个“临界坡比”, 使得当边坡坡比大于该“临界坡比”时, 水平成层边坡具有与均质土坡相同的破坏模式; 反之则以层状边坡的破坏机理破坏。而该“临界坡比”大多在 1.3~1.5 范围内。

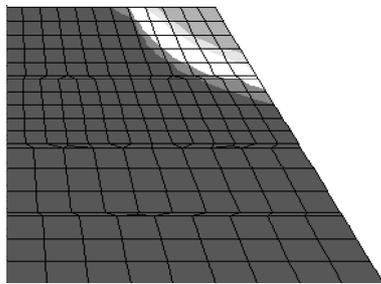


图 10 坡比为 2:1 时剪应变增量云图

Fig. 10 Cloud chart of shear strain increment for slope ratio of 2:1

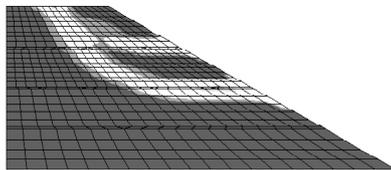


图 11 坡比为 1:2 时剪应变增量云图

Fig. 11 Cloud chart of shear strain increment for slope ratio of 1:2

4 结论

1) 在坡顶逐级加载的情况下, 水平成层土质边坡的滑动面, 首先出露于坡顶加载板后缘; 再以圆弧的形式向边坡内部延伸, 延伸至分层面时沿分层面向坡外发展, 最终从坡面剪出; 最终滑动面形式为圆弧 + 直线型。

2) 在坡顶相同的条形荷载作用下, 水平成层土质边坡分层厚度越大, 其极限承载力越高; 反之, 极限承载力越低。在坡比、加载方式及分层厚度相同的情况下, 坡体高度对极限承载力的影响不明显。

3) 水平成层土质边坡剪出高度随坡顶加载范围的增大呈阶梯形增长趋势, 且与相同条件下的均质土坡的剪出高度存在紧密联系。

4) 水平成层土质边坡具有“临界坡比”, 当坡比大于“临界坡比”时, 滑动面呈圆弧型; 反之则为

圆弧 + 直线型。

参考文献:

- [1] 杨淑碧, 徐进, 董孝璧. 红层地区砂泥岩互层状斜坡岩体流变特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(2): 12-24.
Yang Shubi, Xu Jin, Dong Xiaobi. Rheological Feature of Slope Rockmass Composed of Alternating Beds of Sandstone and Mudstone in Red Beds Area[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(2): 12-24.
- [2] 周应华, 邵江, 罗阳明. 近水平红层边坡变形破坏的力学机制分析[J]. 路基工程, 2006(1): 6-7.
Zhou Yinghua, Shao Jiang, Luo Yangming. Mechanical Mechanism Analysis of Approximate Level Red Bed Slope Deformation Failure[J]. Subgrade Engineering, 2006(1): 6-7.
- [3] 邵江, 李仁成, 周德培, 等. 近水平红层路堑边坡滑动机理和防治对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 174-178.
Shao Jiang, Li Rencheng, Zhou Depei, et al. Preliminary Study of the Slip Mechanism and the Stopping Method on the Land Slide of the Approximately Horizontal Excavated Slope in Red Beds[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 174-178.
- [4] 刘才华, 陈从新. 层状岩质边坡稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 35-40.
Liu Caihua, Chen Congxin. Layered Rock Slope Stability [M]. Beijing: Science Press, 2012: 35-40.
- [5] 王志斌. 岩质斜坡地基上填方路堤稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
Wang Zhibin. Stability Analysis of Fill Embankments on Rock Slope[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [6] 王志斌, 李亮, 杨小礼, 等. 水平条分法在贴坡高填方路堤稳定性分析中的应用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 29-34.
Wang Zhibin, Li Liang, Yang Xiaoli, et al. Application of Horizontal Slice Method in Stability Analysis of High Fill Embankments at Slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 29-34.
- [7] 南京水利科学院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 19-72
Nanjing Water & Power Institute. SL237—1999 Geotechnical Test Specification[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999: 19-72
- [8] 白宪臣. 土工试验教程[M]. 开封: 河南大学出版社, 2008: 45-92.
Bai Xianchen. Geotechnical Test Tutorial[M]. Kaifeng: Henan University Press, 2008: 45-92.

(责任编辑: 邓光辉)