

桩梁组合支护下带裂隙深挖方膨胀渠坡稳定性分析*

李友云¹, 谢继登¹, 刘德取², 张军³, 廖浩成³

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.浙江金丽温高速公路有限公司, 浙江 杭州 325027; 3.湖南省莲株高速公路建设开发有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 针对南水北调中线深挖方膨胀渠坡支护, 利用 ABAQUS 软件建立带裂隙深挖方膨胀渠坡模型, 考虑裂隙面及软弱夹层等土体因素影响, 计算不同裂隙面分布情况下渠坡的安全系数, 分析裂隙面和软弱夹层对渠坡稳定性的影响及桩梁组合支护对带裂隙深挖方膨胀渠坡的可行性。结果表明, 桩梁组合支护下带裂隙膨胀渠坡滑动面呈受裂隙和软弱面控制的偏折线状推移式滑动, 最大位移发生在坡脚处; 单一因素下软弱夹层对渠坡安全系数的减小幅度比裂隙面更大, 不同裂隙面分布会对渠坡安全系数产生一定影响; 桩梁组合支护下, 带裂隙深挖方膨胀渠坡的安全系数达到 1.460, 渠坡稳定。

关键词: 公路; 桩梁组合支护; 膨胀渠坡; 裂隙面; 数值分析

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0099-04

以往膨胀土地区修筑渠坡时, 即使坡率降至 1:5~1:6 的缓坡仍会产生滑坡。抗滑桩是加固膨胀土渠坡的有效措施, 它穿透滑体直至持力层进行锚固, 是一种借助与桩周围土体相互作用, 把滑坡体推力传递到持力层扩散的抗滑结构。李小雷等针对西南地区膨胀土滑坡, 分析了全埋 H 形桩对加固边坡的可行性及与膨胀土边坡相互作用时受力特性。王东海通过有限元模拟, 对不同桩间距的桩梁组合抗滑支护措施进行了对比分析, 但未考虑膨胀渠坡存在大小不一随机分布的裂隙面。卢再华等对原状膨胀土进行三轴剪切试验, 得出软弱夹层及原生裂隙面是决定其剪切强度的主要因素。该文针对南水

北调中线深挖方膨胀渠坡, 考虑受裂隙面、软弱夹层控制的滑动破坏及受气候影响的浅表层蠕动, 建立桩梁组合支护下膨胀渠坡数值计算模型, 分析桩梁组合支护对深挖方带裂隙膨胀渠坡的可行性。

1 有限元模型建立

1.1 基本模型

根据该工程实际设计桩梁组合支护方案, 其中抗滑桩体直径 1.2 m、桩长 13.8 m、桩间距 4 m, 坡面梁截面尺寸为 50 cm×50 cm(见图 1)。

膨胀渠坡模型尺寸为长 69 m, 高 21 m, 坡顶长 20 m, 厚 12 m。根据土体特性, 渠坡上层为弱膨胀

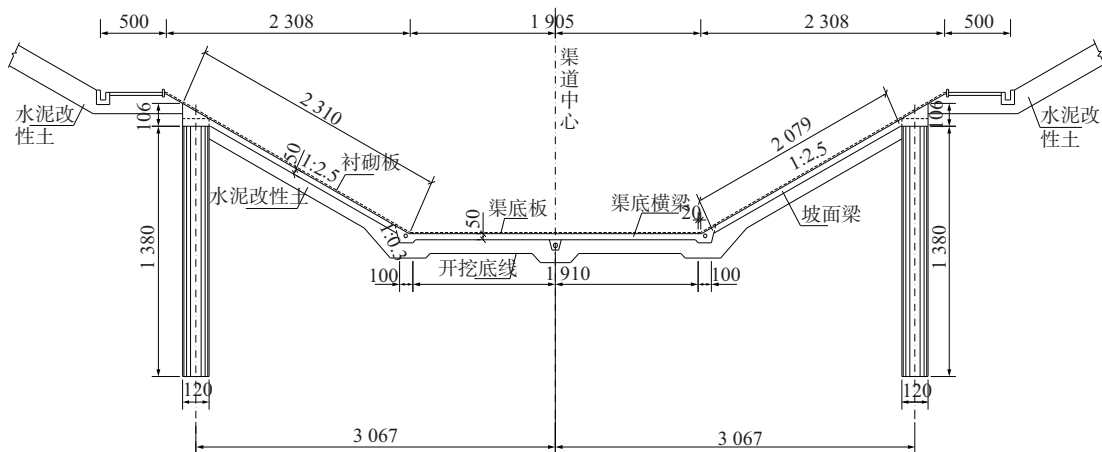


图 1 桩梁组合支护设计示意图(单位: cm)

* 基金项目: 湖南省交通运输厅科技计划项目(201707)

土,中层为中膨胀土,下层为强膨胀土,在中、下层之间存在地下水影响下强度极差的软弱夹层。渠坡稳定性分析中考虑土层存在裂隙情况,利用多尺度分析思想均匀化6 m 尺度裂隙面的强度参数。在4 m 长度范围内的裂隙面与同一尺度的土体构成均质体;对于4 m 长度以上的裂隙面,由裂隙面统计规律随机生成4 m 长度以上长大裂隙面(见图2、图3)。模型中土体采用Mohr-Coulomb 屈服准则、非关联流动法则,桩及梁结构视为刚体。

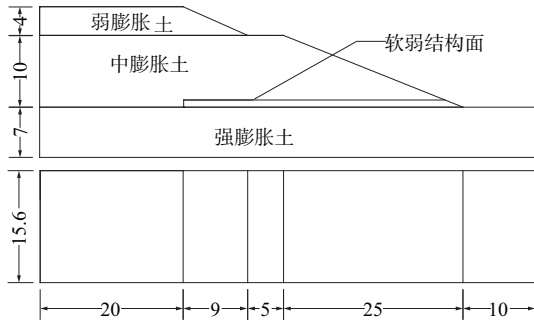


图2 渠坡尺寸示意图(单位:m)

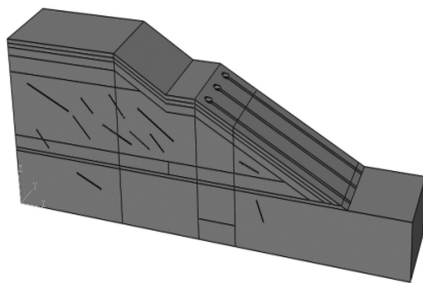


图3 渠坡有限元模型

1.2 裂隙面膨胀土渠坡土体及桩梁组合参数

桩梁组合支护由抗滑桩及坡面梁组成,其参数见表1。

表1 桩梁组合参数

桩梁组合	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
抗滑桩	24	30 000	0.2
坡面梁	24	30 000	0.2

膨胀渠坡浅表层易在气候影响下发生蠕动,进而失稳滑坡,故分析中考虑干湿反复变化下渠坡存在潜在不利状态。参考当地降雨及光照等资料,利用Geostudio 模拟膨胀渠坡表层在干湿循环下随渠坡深度增加产生的强度参数变化,结果表明:干湿作用3个月,渠坡影响深度为0.5 m;干湿作用6个月,渠坡影响深度增加到1 m;干湿作用12个月,渠坡影响深度达到2 m。以受干湿作用1年的最不利工况下强度指标作为膨胀渠坡深度2 m 范围内的计算强度参数(见表2)。

表2 干湿循环影响区域参数

膨胀渠坡 深度/m	粘聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	3个月	6个月	12个月	3个月	6个月	12个月
0.5	5.24	4.16	3.47	23.57	23.40	22.40
1.0	—	5.24	4.16	—	23.57	23.40
2.0	—	—	7.47	—	—	23.68

膨胀渠坡深层土体主要受地下水位变化的影响,土体参数见表3。

表3 深层膨胀渠坡土体参数

材料	重度/ (kN·m ⁻³)	粘聚力/ /kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/kPa	泊松比
强膨胀土	17	20.76	20.75	6 268.975	0.354 1
中膨胀土	16	13.83	20.01	5 190.482	0.354 1
弱膨胀土	15	11.61	18.72	5 112.747	0.354 1
裂隙	15	14.00	4.00	1 296.000	0.450 0
软弱结构面	15	8.00	7.00	5 300.000	0.350 0

1.3 受地下水位变化影响的深层膨胀土含水率及膨胀系数分析

根据现场分析报告,该膨胀渠坡最深层强膨胀土层含水率基本保持稳定(26.6%),为饱和状态;中膨胀土层受地下水位影响的含水率变化主要反生在高度z 为7~9 m 处,含水率W 变化沿深度方向呈现负指数函数关系,函数表达式见式(1)。各含水率变化区位x 的体膨胀系数α 见式(2),体膨胀量为αW(x,y,z)。

$$W=0.038 \cdot e^{-2.970 1(z-7)} \quad (0 \leq z \leq 9) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = 0.477 \cdot \frac{-0.024 2 \ln(332 - 16z) + 0.140 9}{-0.011 5 \ln(332 - 16z) + 0.109 8} & (0 \leq x \leq 20) \\ \alpha = 0.477 \cdot \frac{-0.024 2 \ln\{[20(29 - x)]/3 + 16(17 - z)\} + 0.140 9}{-0.011 5 \ln\{[20(29 - x)]/3 + 16(17 - z)\} + 0.109 8} & (20 \leq x \leq 29) \\ \alpha = 0.477 \cdot \frac{-0.024 2 \ln[16(17 - z)] + 0.140 9}{-0.011 5 \ln[16(17 - z)] + 0.109 8} & (29 \leq x \leq 34) \\ \alpha = 0.477 \cdot \frac{-0.024 2 \ln\{16(17 - z) - [32(x - 34)]/5\} + 0.140 9}{-0.011 5 \ln\{16(17 - z) - [32(x - 34)]/5\} + 0.109 8} & (34 \leq x \leq 59) \end{cases} \quad (2)$$

2 桩梁组合下带裂隙深挖方膨胀渠坡的稳定性

2.1 桩梁组合对带裂隙深挖方膨胀渠坡支护的可行性分析

对桩长 13.8 m、桩径 1.2 m、桩间距 4 m 下桩梁组合支护渠坡进行模拟计算,以计算是否收敛作为判定标准获取安全系数。渠坡等效应变和安全系数见图 4、图 5。

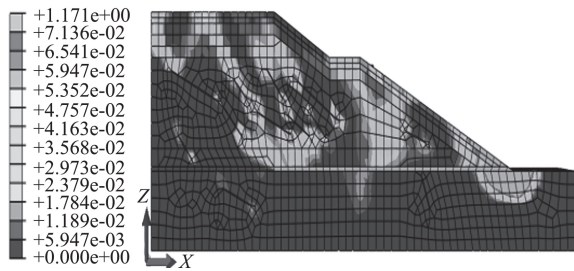


图 4 桩梁组合支护下渠坡等效塑性应变云图(单位:cm)

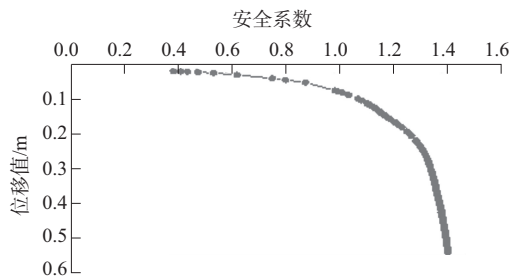


图 5 桩梁组合支护下渠坡安全系数

由图 4 可知:在桩梁组合支护下,带裂隙膨胀渠坡的滑动面呈现受裂隙和软弱面控制的偏折线状推移式滑动,在裂隙面和软弱夹层共同影响下渠坡偏向强度较弱的土体(沿着裂隙面和软弱夹层)滑动,最大位移出现在坡脚附近。

由图 5 可知:桩梁组合支护下膨胀渠坡的安全系数达 1.460,满足相关规范的要求,说明桩梁组合设计方案可行。

2.2 裂隙面与软弱夹层对深挖方膨胀渠坡支护稳定性的影响

受裂隙面和软弱夹层等内部土体因素影响,膨胀渠坡的滑动面逐渐贯通而导致失稳破坏。考虑随机分布带来的偶然误差,建立 5 种具有不同分布规律裂隙面和无裂隙面膨胀渠坡模型,模型尺寸相同(见图 6、图 7),分析有无裂隙面和软弱夹层时桩梁组合支护下渠坡的稳定性。各工况下渠坡安全系数见表 4。

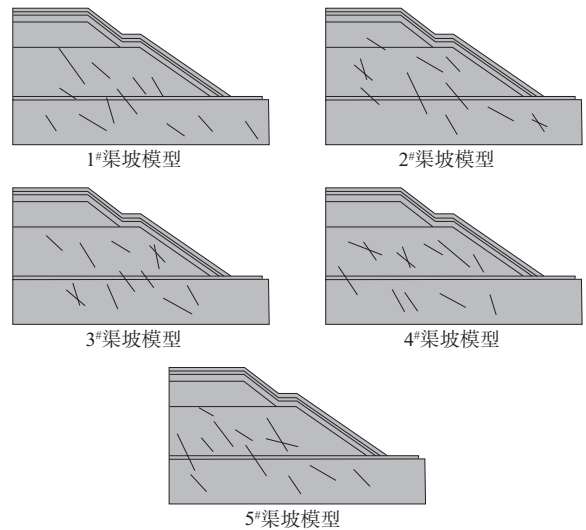


图 6 带裂隙面渠坡模型

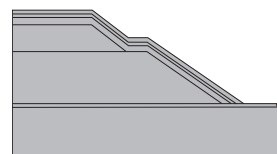


图 7 无裂隙渠坡模型

表 4 各工况下采用桩梁组合支护时渠坡的安全系数

渠坡编号	裂隙面	软弱夹层	安全系数	渠坡编号	裂隙面	软弱夹层	安全系数
1	0	0	1.901	3-5	1	0	1.611
2	0	1	1.117	4-1	1	1	0.766
3-1	1	0	1.447	4-2	1	1	0.841
3-2	1	0	1.419	4-3	1	1	0.821
3-3	1	0	1.477	4-4	1	1	0.809
3-4	1	0	1.439	4-5	1	1	0.832

注:“1”表示有裂隙面、软弱夹层;“0”表示无裂隙面、软弱夹层。下同。

由表 4 可知:桩梁组合支护下,没有裂隙面和软弱夹层时渠坡的安全储备极大,渠坡稳定。存在软弱夹层而无裂隙面时,渠坡安全系数大幅减小,软弱夹层直接影响渠坡的稳定性,渠坡处于临界滑动状态。存在裂隙面而无软弱夹层时,渠坡安全系数在 1.479 上下浮动,裂隙面较大幅度降低了渠坡的稳定性。裂隙面和软弱夹层的存在会减小渠坡的安全系数,控制土体滑坡,影响渠坡的稳定性。但在单一因素影响下,相对于裂隙面,软弱夹层对渠坡安全系数的减小幅度更大。这是由于长大裂隙面经过后天改造常形成强度更低、填充着灰绿色黏土的光滑的软弱夹层,软弱夹层是膨胀渠坡失稳过程中破坏性、

活跃度最大的因素。在裂隙面和软弱夹层共同作用下,渠坡稳定性急剧下降,渠坡安全系数在 0.814 左右,渠坡将产生滑移失稳破坏。从存在随机分布裂隙面的 5 个渠坡来看,裂隙面的产状、组合特征、裂隙倾角都会影响渠坡的安全系数。

2.3 抗滑桩对含裂隙面深挖方膨胀渠坡支护的稳定性分析

考虑软弱夹层的存在,分析仅采用抗滑桩支护时存在裂隙面深挖方膨胀渠坡的稳定性。各工况下渠坡安全系数见表 5。

表 5 各工况下采用抗滑桩支护时渠坡的安全系数

渠坡编号	裂隙面	抗滑桩	安全系数	渠坡编号	裂隙面	抗滑桩	安全系数
1	0	1	0.981	2-3	1	1	0.952
2-1	1	1	0.928	2-4	1	1	0.954
2-2	1	1	0.977	2-5	1	1	0.918

由表 5 可知:仅存在软弱夹层的不利条件下,抗滑桩的支护效果较差,安全系数为 0.981,达不到设计规范要求;同时存在裂隙面和软弱夹层的情况下,使用抗滑桩支护渠坡的效果更差,安全系数在 0.946 上下波动,不利于渠坡的稳定。在裂隙面和软弱夹层共同影响下膨胀渠坡的稳定性更差,单采用抗滑桩不足以使渠坡保持稳定,采用桩梁组合支护体系才能保障膨胀渠坡的稳定性。

3 结论

利用 ABAQUS 软件建立有无裂隙面和软弱夹层、有无桩等条件下深挖方膨胀土渠坡模型,计算各条件下渠坡的安全系数,分析其对带裂隙深挖方膨胀渠坡稳定性的影响。结论如下:

- (1) 桩梁组合支护下带裂隙膨胀渠坡滑动面呈受裂隙和软弱面控制的偏折线状推移式滑动(沿裂隙面和软弱夹层),最大位移出现在坡脚附近。
- (2) 裂隙面与软弱夹层都会降低渠坡的稳定性,单一因素下软弱夹层对渠坡安全系数的减小幅

度比裂隙面大;裂隙面的产状、组合特征、裂隙倾角都会对渠坡安全系数产生一定影响。

- (3) 裂隙面和软弱夹层共同作用下,渠坡安全系数在 0.814 左右,渠坡将产生滑移失稳破坏。
- (4) 考虑软弱夹层的存在,抗滑桩支护下,深挖方膨胀渠坡的安全系数为 0.92~0.98,不足以使渠坡保持稳定;桩梁组合支护下,渠坡安全系数达到 1.460,能保障深挖方膨胀渠坡的稳定性。

参考文献:

[1] 包承纲,刘特洪.豫西南膨胀土的工程地质特性和渠道边坡的稳定性问题[A].非饱和土的理论与实践学术讨论会论文集[C].1992.

[2] 刘协强.抗滑桩在公路边坡加固治理中的应用研究[D].长沙:中南大学,2007.

[3] 李小雷,张泽坤,罗威,等.H型抗滑桩加固膨胀土滑坡的有限元分析及优化设计[J].路基工程,2016(6).

[4] 颜天佑.膨胀土挖方渠道抗滑桩加固措施效果分析[A].膨胀土岩土工程技术国际学术研讨会论文集[C].2014.

[5] 王东海.南水北调深挖方膨胀土渠坡滑坡机理及抗滑措施优化[D].长沙:长沙理工大学,2014.

[6] 卢再华,陈正汉,曹继东.原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J].岩土力学,2001,22(3).

[7] 费康,彭勤.ABAQUS岩土工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2017.

[8] 周娟.南水北调深挖方膨胀土渠坡抗滑桩作用机理分析[D].长沙:长沙理工大学,2014.

[9] 张胜军.深挖方膨胀土渠道膨胀土工程特性测试分析报告[R].武汉:水利部长江勘测技术研究所,2013.

[10] 易万胜.带裂隙膨胀土力学性能多尺度计算及坡体滑移路径研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[11] 李颖,陈诚,解林.南水北调中线膨胀土试验段深挖方渠坡柔性支护技术[J].工程抗震与加固改造,2016(4).

[12] 高建新,赵东城,王珊珊.抗滑桩+坡面梁新型支护型式在膨胀土处理中的应用[J].河南水利与南水北调,2019(5).

收稿日期:2019-07-03

(上接第 98 页)

[9] 陈强,韩军,刘自楷,等.武汉绕城高速公路生态防护膨胀土边坡失稳的几种形式及加固处理[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊 2).

[10] 徐丽丽,刘丽佳,徐昭巍,等.季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J].岩土工程学报,2016,38(增刊 1).

[11] 张良以,陈铁林,张顶立.降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J].岩土工程学报,2019,41(1).

[12] 张锐,刘正楠,郑健龙,等.膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙的作用[J].中国公路学报,2018,31(2).

[13] 肖杰,杨和平.膨胀土边坡浅层坍塌破坏原因剖析[J].公路交通科技,2016,33(7).

[14] 张锐,郑健龙,颜天佑,等.南水北调中线工程浅层滑坡综合防治研究[J].水利水电技术,2014,45(10).

收稿日期:2019-07-04