

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.012

含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析

甘磊¹,吴健²,戴寿晔³,马洪影¹

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京210098;2.江苏省水利勘测设计研究院有限公司,江苏扬州225000;
3.江苏致远工程勘测设计有限公司,江苏淮安223005)

摘要:某长江隧道穿越江北大堤,堤身出现施工贯穿式裂缝,且累计沉降较大。考虑长江大堤堤身不同深度施工裂缝对堤身渗透稳定及堤坡抗滑稳定的影响,建立隧道穿越段大堤渗流有限元模型和边坡稳定分析模型,采用饱和-非饱和渗流有限元法和瑞典圆弧法,计算分析历史最高水位条件下不同深度裂缝堤防的渗流性态和堤坡稳定性。计算结果表明:深层搅拌桩对堤防渗流和稳定均有利;贯穿式裂缝对裂缝周围地层的渗流场影响较大,但当裂缝深度小于8.5 m时,堤身与堤基的最大渗透坡降分别为0.206和0.181,均小于相应材料的允许渗透坡降值,堤防渗透稳定能满足要求;贯穿式裂缝位置和深度对堤坡稳定影响显著,当裂缝深度为8.5 m时,两个不同裂缝位置的堤防抗滑稳定安全系数分别为2.419和1.844,当裂缝深度小于8.5 m时,经过深层搅拌桩加固处理后,堤坡稳定能满足要求。

关键词:隧道穿越段;堤防;渗流;边坡稳定;施工裂缝

中图分类号:TU44 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)01-0085-06

Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section

GAN Lei¹, WU Jian², DAI Shouye³, MA Hongying¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Provincial Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;
3. Jiangsu Zhiyuan Engineering Survey and Design Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

Abstract: After the tunnel-shield-driving machine excavated through the north levee of Yangtze River, several transverse construction cracks appeared in the river embankment, and the accumulative settlement of the embankment was large. This paper considered the influence of the cracks in the embankment construction of different depths on the seepage and slope stability of the Yangtze River embankment. Based on the saturated-unsaturated seepage finite element method and the Sweden slice method, the seepage and slope stability analysis models of the embankment in the tunnel crossing section were established to calculate the seepage behavior and slope stability of the embankment under different crack depths, when the river level was the highest in history. The results show that the deep mixing pile has significantly reduced the water head and reinforced the slope of the embankment. The through cracks have great influence on the seepage field of the stratum around cracks. When the crack depth is less than 8.5 m, the maximum seepage gradient of dam foundation and body is 0.181 and 0.206 respectively, which is less than the allowable seepage gradient of the corresponding soil layer. Therefore, the seepage stability of the embankment satisfies the requirement. Moreover, the influence of location and depth of through cracks on the slope stability of the embankment is obvious. When the crack depth is 8.5 m, the safety factors of slope under two different positions of through cracks are 2.419 and 1.844 respectively after the reinforcement of deep mixing piles. The slope stability of the reinforced embankment with deep mixing piles can meet the standard requirements when the crack depth is less than 8.5 m.

Key words: tunnel crossing section; embankment; seepage; slope stability; construction cracks

随着我国城市的快速发展,大型过江、过河隧道越来越多。采用泥水盾构法在软土地区修筑水底隧道时,不可避免地要穿越堤防^[1]。隧道穿越段堤防由于施工扰动以及土体开挖等原因,需要关注几个问题:①施工扰动会导致堤防发生不均匀沉降,堤身易形成裂缝^[2],严重降低堤防抗渗性能和边坡稳定;②施工扰动

基金项目:国家自然科学基金(52179130, 51609073);江苏省自然科学基金(BK20201312)

作者简介:甘磊(1987—),男,副教授,博士,主要从事水工结构稳定分析研究。E-mail:ganlei2015@hhu.edu.cn

引用本文:甘磊,吴健,戴寿晔,等.含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90.

GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 85-90.

改变了堤防土层的密实度,使原有土层的渗透系数变大,导致渗流量增大,甚至造成渗透破坏及接触破坏等,且其土层黏聚力和摩擦角变小,易发生失稳破坏^[3];③渗透水流经堤身从隧道未衬砌段流出,将导致隧道顶部土层渗透坡降增大^[4]。

在堤防渗流分析方面,胡学林^[5]认为在定向穿越工程中对穿越孔洞壁与管壁之间进行填充密实,可有效降低堤防渗透破坏的风险;姜树海等^[6]建立了定量预测堤防渗流风险率的实用模型,指出堤防内外的水位差异是影响渗流风险率的重要因素;韦鹏昌等^[7]提出渗透破坏是堤防失事的主要诱因,采用水泥土防渗墙等进行防渗加固可明显降低堤防失事的综合风险率。在裂缝对边坡稳定影响研究方面,陈铁林等^[8]分析了有无裂缝对膨胀土和非膨胀土边坡的影响,认为裂缝是诱发滑坡的重要因素;蒋泽锋等^[9]提出了降雨条件下含张裂缝边坡的临界滑动场数值模拟方法,计算结果表明降雨条件下张裂缝位置对边坡稳定的影响较大;王小兵等^[10]建立了边坡抗滑稳定失效概率计算模型,分析结果表明堤坡抗滑稳定安全系数随着土体黏聚力和内摩擦角的减小而减小;邓东平等^[11]研究了张裂缝位置及水位对边坡稳定性的影响,计算结果表明张裂缝位置离坡顶距离越近,稳定性越小,张裂缝内水位越高,边坡越不稳定。

穿堤隧道的建设与运行改变了堤防原有的渗流场和结构,施工裂缝、堤身渗透系数变大及隧道顶部水力坡降增大等问题威胁着堤防的整体安全。本文针对某长江隧道穿越段堤防,重点考虑施工裂缝对堤防渗流性态和边坡稳定的影响,计算最高水位条件下不同深度裂缝堤防各分区渗透坡降及边坡抗滑稳定安全系数,综合评价该穿越段堤防的稳定性。

1 工程概况

某长江隧道穿越段,隧道采用泥水平衡式盾构施工,为双管盾构隧道,盾构开挖直径 14.96 m,隧道为北西—南东走向,总长度为 3 510.00 m,盾构长度为 2 932.76 m,洞径约 14.30 m,北岸起点底板标高约-19.00 m,中段最低处底板标高约-51.00 m,南岸终点洞口底板标高约-16.00 m。该堤防为重要防洪工程,保护等级为 2 级。大堤基底至隧道顶的距离为 11.50~12.50 m,堤身堆填物为粉质黏土,顶面宽 8.00~10.00 m,标高约 11.70 m,堤顶挡水墙高出大堤约 1.0 m。第二台盾构机穿越期间,大堤顶部地面出现两道裂纹,其内部结构复杂,且其施工期处于长江汛期。为确保长江大堤安全度汛,需评价其在历史高水位条件下的堤防渗流性态和边坡稳定状况。

2 研究方法

2.1 基本理论

渗流有限元分析采用饱和-非饱和渗流基本理论^[12],将非饱和区土中水分运动和饱和区地下水运动相互联系,水在饱和土及非饱和土中均服从达西定律,饱和土的渗透系数是常数,而非饱和土的渗透系数则为土体饱和度的函数。

边坡稳定计算采用瑞典彼得森于 1916 年提出的瑞典圆弧法^[13],假定土坡失稳破坏简化为一平面应变问题,破坏滑动面为一圆弧形面。计算时将可能滑动面以上的土体划分成若干铅直土条,不考虑土条间相互作用力的影响。

2.2 计算模型

三维有限元计算模型如图 1 所示。图 1 模拟了隧道穿越段堤防主要结构和地层地质条件,考虑了各材料分区的性质差异,通过控制断面超单元法生成有限元网格^[14-15],经加密细分后形成三维有限元网格,其结点总数及单元总数分别为 28 342 和 25 304。模型边界条件规定如下:堤防迎水坡和背水坡水位以

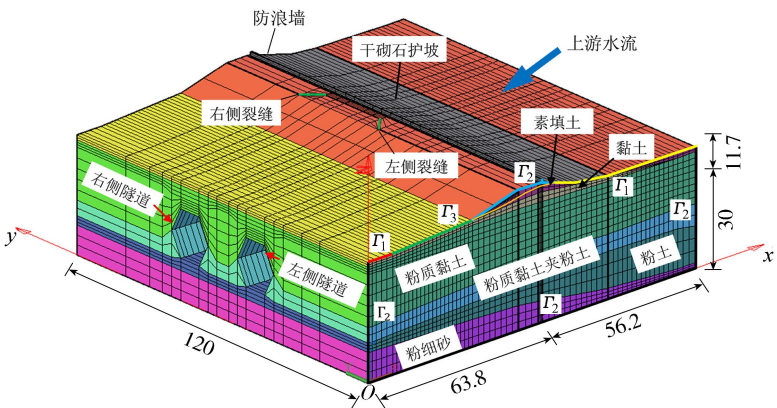


图1 堤防三维有限元计算模型(单位:m)

Fig.1 3D finite element model of the embankment (unit: m)

下部分分别为上游和下游已知水头边界 I_1 ;
 $x=0$ 、 120 m 、 $y=0$ 、 120 m 、 $z=0\text{ m}$ 截取边界为不透水边界 I_2 ;堤防背水坡面下游水位以上部分为出渗边界 I_3 。

2.3 计算参数及工况

结合工程地质情况和地质勘探成果,各分区材料的渗透系数见表1。计算选取历史最高水位(10.22 m)作为上游水位,下游水位为6.00 m。为解决施工裂缝引起的渗流和稳定问题,需对堤身进行防渗加固处理。采用大堤面以下10 m 范围内单排、10 m 以上双排的深层搅拌桩加固方案,桩体深度达到隧道洞身一半以下2 m。改变模型中堤顶裂缝深度,分析不同裂缝深度对堤防渗流性态的影响,渗流计算工况如表2所示(工况C-2~C-6布设深层搅拌桩,工况C-1和C-7无深层搅拌桩)。基于等效处理方法^[16],将堤顶裂缝假定为具有高渗透系数(10^3 cm/s)的等效连续渗透介质。

3 结果与分析

堤防浸润面选取渗流稳定分析中相应工况计算得到的稳定浸润面,分别调整模型中堤顶中部和背水坡旁的裂缝深度,模拟不同深度裂缝工况。边坡稳定计算工况如表3所示(工况S-1~S-9无深层搅拌桩,工况S-10和S-11布设深层搅拌桩)。

3.1 渗流计算结果

堤防渗流出逸坡降、堤身最大渗透坡降及堤身单宽流量等渗流成果如表4所示,其中,堤身单宽流量是指计算模型深度范围内沿大堤轴线单宽平均流量,堤基最大渗透坡降发生在粉质黏土层,其规范允许值为0.45;堤身最大渗透坡降发生在黏土层,其规范允许值为0.40;堤防渗流在背水坡素填土层出逸,其规范允许值为0.35。工况C-6堤防地下水位等值线分布如图2所示。由图2可知,堤防整体渗流场位势分布较为明确,地下水位等值线分布规律清晰,大部分等值线自上游向下游均匀分布,深层搅拌桩内的位势等值线明显密集,浸润面明显降低,消减水头作用明显。

不同裂缝深度工况下 $y=60\text{ m}$ 断面和裂缝处水头等值线分别如图3和图4所示,不同裂缝深度工况下位势等值线上升较为均匀,在裂缝处发生突变,凸向上游,局部渗透坡降增大,对此处渗流场造成较大影响,且有可能引起土

表1 各分区材料计算参数

Table 1 Calculation parameters of each material zone				
材料	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
素填土	3.0×10^{-5}	20.0	10	23
黏土	2.0×10^{-6}	18.5	25	18
粉质黏土	3.0×10^{-6}	19.5	20	20
粉质黏土夹粉土	6.0×10^{-6}	19.5	16	16
粉土	3.0×10^{-4}	18.5	8	18
粉细砂	4.0×10^{-3}	17.6	17	33
深层搅拌桩	5.0×10^{-7}	20.0	320	25
干砌石护坡	5.0×10^{-1}			

表2 渗流计算工况

Table 2 Calculation conditions of seepage analysis			
工况	裂缝深度/m	工况	裂缝深度/m
C-1	0	C-5	7.5
C-2	0	C-6	8.5
C-3	5.5	C-7	11.5
C-4	6.5		

表3 边坡稳定计算工况

Table 3 Calculation conditions of slope stability					
工况	裂缝深度/m	裂缝位置	工况	裂缝深度/m	裂缝位置
S-1	0	无裂缝	S-7	6.5	堤顶中部
S-2	5.5	背水坡旁	S-8	7.5	堤顶中部
S-3	6.5	背水坡旁	S-9	8.5	堤顶中部
S-4	7.5	背水坡旁	S-10	8.5	背水坡旁
S-5	8.5	背水坡旁	S-11	8.5	堤顶中部
S-6	5.5	堤顶中部			

表4 堤防渗流计算结果

Table 4 Seepage results of the embankment				
工况	背水坡出逸坡降	堤基最大渗透坡降	堤身最大渗透坡降	堤身单宽流量/ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)
C-1	0.171	0.129	0.208	7.445
C-2	0.071	0.152	0.189	6.618
C-3	0.073	0.153	0.192	6.846
C-4	0.074	0.166	0.195	6.916
C-5	0.074	0.173	0.199	7.015
C-6	0.075	0.181	0.206	7.146
C-7	0.179	0.191	0.376	8.547

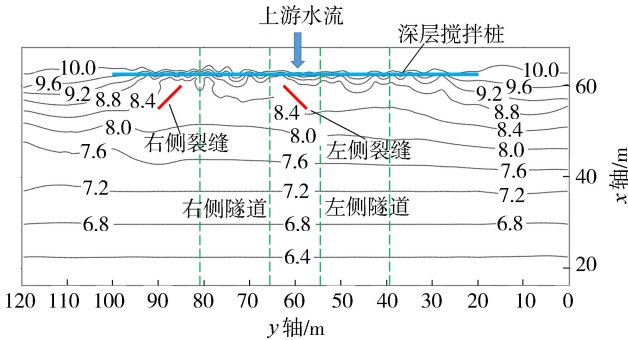


图2 工况C-6堤防地下水位等值线(单位:m)
Fig.2 Groundwater level contour in embankment area under Condition C-6 (unit: m)

体发生渗透破坏,甚至造成裂缝扩展或裂缝下游处地层沉降,危害堤防的稳定性。

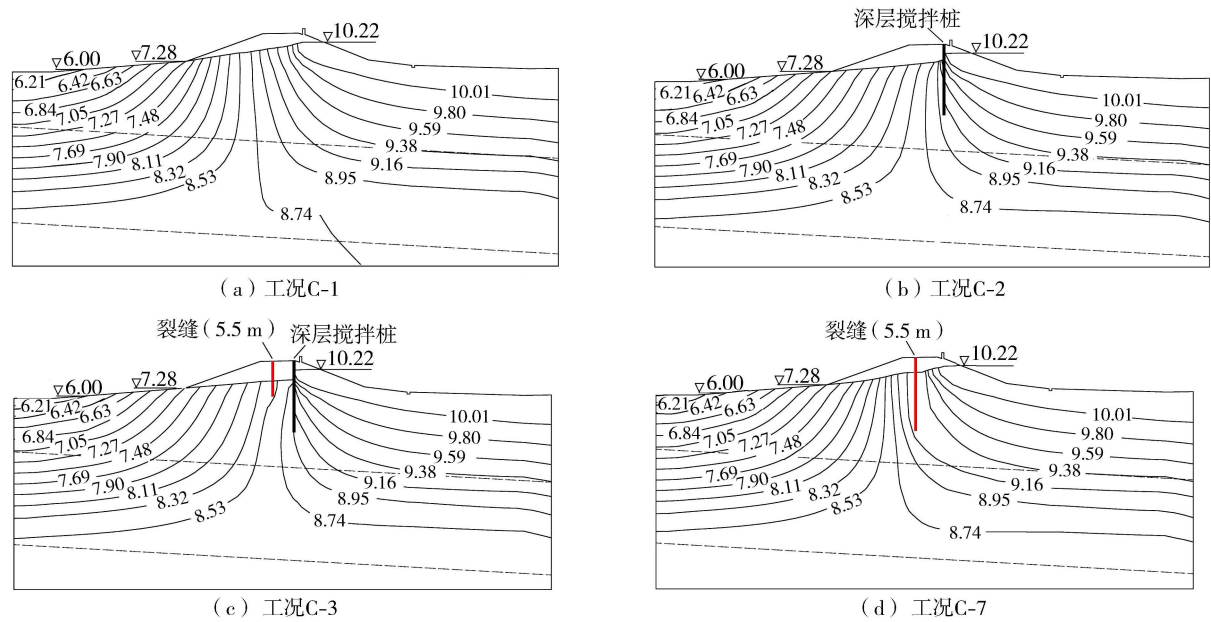


图3 不同裂缝深度典型工况 $y=60\text{ m}$ 断面水头等值线分布(单位:m)

Fig.3 Water head contour distribution of embankment (Section $y=60\text{ m}$) under different crack depths (unit: m)

当堤防设有深层搅拌桩且无裂缝时(工况 C-2),堤防单宽流量为 $6.618\text{ m}^3/\text{d}$,当裂缝深度分别为 5.5 m 、 6.5 m 、 7.5 m 和 8.5 m 时,堤防单宽流量分别增大 3.45% 、 4.50% 、 6.00% 和 7.98% 。随着裂缝深度的不断增加,堤防单宽流量不断增大。由工况 C-1 和 C-2 对比可知,经深层搅拌桩防渗加固处理后,堤防单宽流量减少了 11.18% ,出逸坡降和最大渗透坡降分别降低了 58.48% 和 9.13% ,堤基浸润面明显降低,减小了施工裂缝对堤防渗漏的影响,且有效削弱了贯穿式裂缝深度对堤防渗流性态的影响。

堤防渗流计算成果见表4。当堤身布设深层搅拌桩且裂缝深度为 $5.5\sim 8.5\text{ m}$ 时,堤身最大渗透坡降为 0.206 ,出现在深层搅拌桩上游不远处;堤基地层的最大渗透坡降为 0.181 ,出现在堤防裂缝处;背水坡最大出逸坡降为 0.075 ,均小于相应地层的允许渗透坡降,能满足渗透稳定要求。当堤身不做深层搅拌桩处理、裂缝深度达到 11.5 m 时(工况 C-7),堤身最大渗透坡降为 0.376 ,出现在素填土层,大于规范允许值 0.350 。结果表明,当贯穿式裂缝深度超过 11.5 m 时,若不进行深层搅拌桩防渗加固处理,堤防易发生渗透破坏。

3.2 边坡稳定计算结果

典型工况及不同裂缝位置和深度工况下堤坡最危险滑动面分别如图5和图6所示,可见不同裂缝位置和深度工况下,最危险滑动面滑移方向均从上游滑向下游,且随着裂缝的加深,滑弧也向深处延伸,滑移面积增大,对周围结构造成较大影响,使附近土体发生滑坡或塌陷,危害堤防的稳定性。

当堤防无裂缝时,最危险滑动面主要位于背水坡处;堤顶出现贯穿式裂缝后,裂缝深度大于背水坡高度,在稳定渗流场作用下,最危险滑动面出现在裂缝上游侧,滑动面深度与裂缝深度相近。裂缝的存在影响了滑动面的分布,由堤坡上移至堤顶,使较为稳定的堤顶易发生失稳破坏。

该长江隧道穿越段堤防属于2级堤防工程,采用瑞典圆弧法进行稳定计算时,正常运用条件下,该堤坡最小抗滑稳定安全系数应不小于 $1.250^{[17]}$ 。堤坡抗滑稳定计算成果如表5所示(允许抗滑稳定安全系数为 1.250),工况 S-1 的抗滑稳定安全系数为 3.303 ,远大于允许抗滑稳定安全系数 1.250 ,且安全富余量较大,说明无裂缝工况下堤坡比较稳定。

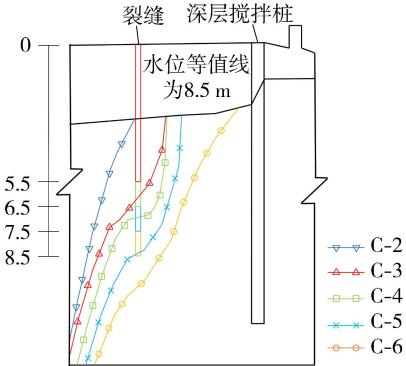


图4 不同工况下裂缝处水头等值线分布(单位:m)

Fig.4 Water head contour distribution around the crack under different conditions (unit: m)

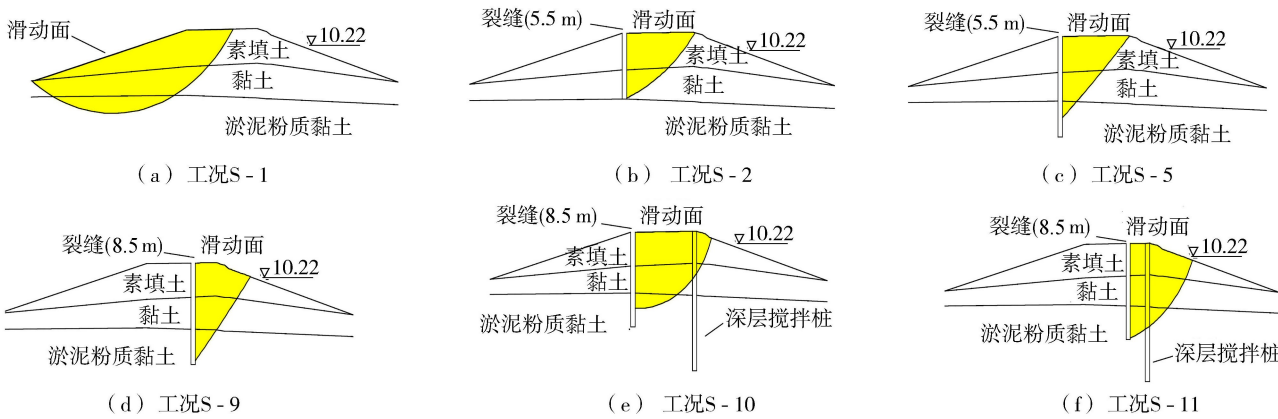


图 5 典型工况下堤防最危险滑动面示意图(单位:m)

Fig.5 Most dangerous sliding surfaces of the embankment under typical conditions (unit: m)

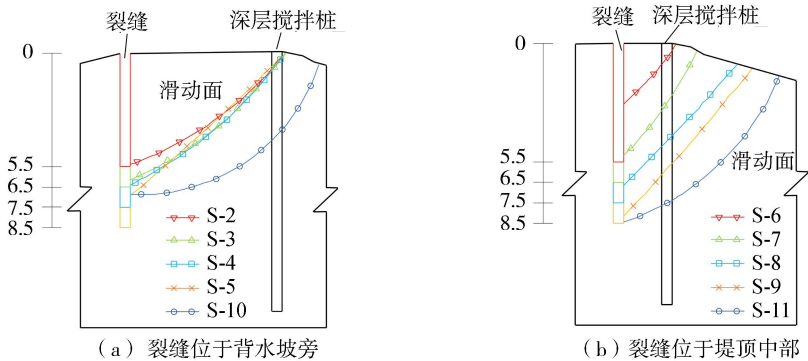


图 6 不同裂缝位置和深度工况下堤防最危险滑动面(单位:m)

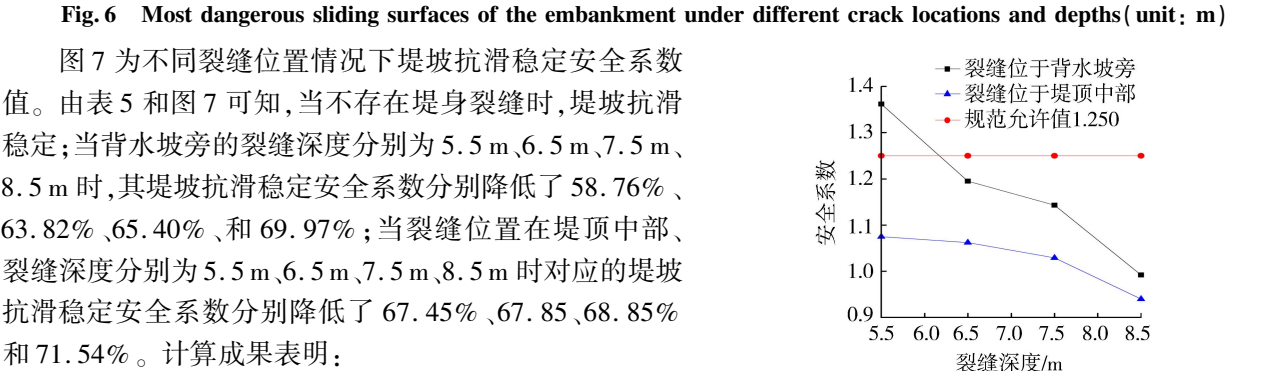


图 7 不同裂缝位置情况下堤坡抗滑稳定安全系数值

Fig.7 Safety factors of anti-sliding stability of embankment slope under different crack positions

表5 堤坡抗滑稳定计算成果
Table 5 Slope stability results of the embankment

工况	x	z	半径/m	抗滑稳定安全系数	工况	x	z	半径/m	抗滑稳定安全系数
S-1	46.899	20.560	16.002	3.303	S-7	46.584	19.640	19.328	1.062
S-2	49.835	21.910	16.749	1.362	S-8	-17.614	83.041	110.61	1.029
S-3	48.404	21.605	17.721	1.195	S-9	-36.451	93.673	132.570	0.940
S-4	46.805	21.910	19.779	1.143	S-10	55.928	13.787	9.096	2.419
S-5	-19.535	93.605	116.380	0.992	S-11	56.310	14.906	10.465	1.844
S-6	48.404	21.605	17.721	1.075					

4 结 论

a. 堤顶贯穿式裂缝对堤防渗流场的影响较为明显。当堤顶贯穿式裂缝深度变化后,此处水头等值线发生突变,局部渗透坡降增大,堤防单宽流量增大,对此处渗流场影响较大。当裂缝深度为 5.5 ~ 8.5 m 时,出逸坡降与堤身最大渗透坡降均小于相应土体的允许渗透坡降,满足渗透稳定要求。

b. 堤顶贯穿式裂缝对堤防抗滑稳定具有一定的影响。当裂缝位于堤顶中部时,相同裂缝深度下,较背水坡旁危害性更大。当裂缝位于堤顶中部、裂缝深度大于 5.5 m 时,抗滑稳定安全系数小于 1.075,不满足规范要求。当裂缝位于背水坡旁、裂缝深度大于 6.17 m 时,抗滑稳定安全系数小于 1.250,不满足规范要求。

c. 深层搅拌桩改善堤防渗流场与加固堤坡抗滑稳定作用显著。经深层搅拌桩防渗加固处理后,堤基浸润面明显降低,渗透坡降与堤防单宽流量减小,减小了施工裂缝对堤防渗漏的影响。当裂缝深度为 8.5 m 时,经深层搅拌桩加固处理后,裂缝位于背水坡旁和堤顶中部的抗滑稳定安全系数分别从 0.992、0.940 增大至 2.419、1.844,深层搅拌桩提高堤防抗滑稳定效果显著。

参考文献:

[1] 吴世明,林存刚,张忠苗,等. 泥水盾构下穿堤防的风险分析及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(5):1034-1042. (WU Shiming, LIN Cungang, ZHANG Zhongmiao, et al. Risk analysis and control for slurry shield under-passing embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(5):1034-1042. (in Chinese))

[2] 林存刚,张忠苗,吴世明,等. 泥水盾构掘进参数对地面沉降影响实例研究[J]. 土木工程学报,2012,45(4):116-126. (LIN Cungang, ZHANG Zhongmiao, WU Shiming, et al. Case study of slurry shield driving parameters' influences on ground surface settlements[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(4):116-126. (in Chinese))

[3] 王玉锁,陈炜韬,王明年. 砂土质隧道围岩黏聚力影响因素的试验研究[J]. 水文地质工程地质,2006,33(6):48-51. (WANG Yusuo, CHEN Weitao, WANG Mingnian. Test research for influencing factors of the cohesive strength of sand soil tunnel surrounding rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2006,33(6):48-51. (in Chinese))

[4] 刘强,谭忠盛,王秀英. 水下隧道渗流场分布规律的模型试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊 1):388-392. (LIU Qiang, TAN Zhongsheng, WANG Xiuying. Model test study on the distribution law of underwater tunnel seepage field[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(Sup1):388-392. (in Chinese))

[5] 胡学林. 定向穿越工程对堤防安全影响评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(3):411-414. (HU Xuelin. Safety analysis of the levee of directional drilling crossing project [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2010,33(3):411-414. (in Chinese))

[6] 姜树海,范子武. 堤防渗流风险的定量评估方法[J]. 水利学报,2005,36(8):994-999. (JIANG Shuhai, FAN Ziwu. Quantitative assessment of embankment seepage risk [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (8): 994-999. (in Chinese))

[7] 韦鹏昌,蒋水华,江先河,等. 考虑多破坏模式的堤防工程失事风险率分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(1):9-15. (WEI Pengchang, JIANG Shuihua, JIANG Xianhe, et al. Analysis of the risk rate of dike projects with multiple failure modes failure modes[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2020,53(1):9-15. (in Chinese))

[8] 陈铁林,邓刚,陈生水,等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):210-215. (CHEN Tielin, DENG Gang, CHEN Shengshui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(2):210-215. (in Chinese))