

长江河道堤防裂缝成因分析与处理方法

薛子龙¹, 万景红², 马雨衍¹, 朱震东¹, 姚 璐¹

(1. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011; 2. 江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223200)

摘要: 长江堤防南京段路面裂缝主要呈现为横向裂缝与纵向裂缝, 横缝长度、缝宽、深度总体上均小于纵缝, 横缝主要由地基不均匀沉降及温度应力引起, 纵缝主要由滑坡及重物荷载引起。土壤自重应力、剪切应力、温度应力均能引起堤防裂缝, 其中剪切应力是造成堤防裂缝的最主要形式, 由于土壤存在内摩擦角 φ , 土体剪切破坏时的破裂面与大主应力作用面的角度呈 $45^\circ + \varphi/2$ 。缝隙灌浆、护坡加固与开挖回填是处理堤防路面裂缝的有效措施, 能够减小土壤颗粒之间的缝隙, 增加堤防的整体强度和稳定性, 提高堤防的整体安全性能。

关键词: 长江堤防; 横向裂缝; 纵向裂缝; 剪切应力; 内摩擦角

中图分类号: TV871

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)09-0069-0004

Analysis of causes and treatment methods for cracks in the Yangtze River Embankment

XUE Zilong¹, WAN Jinghong², MA Yuyan¹, ZHU Zhendong¹, YAO Lu¹

(1. Nanjing Yangtze River Administration Office, Nanjing 210011, China;

2. General Irrigation Canal Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223200, China)

Abstract: The road surface cracks in the Nanjing section of the Yangtze River embankment mainly present as transverse cracks and longitudinal cracks. The length, width, and depth of the transverse joints are generally smaller than those of the longitudinal joints. The transverse joints are mainly caused by uneven settlement of the foundation and temperature stress, while the longitudinal joints are mainly caused by landslides and heavy loads. Soil self weight stress, shear stress, and temperature stress can cause cracks in embankments, among which shear stress is the most common form of crack formation. Due to the presence of internal friction angle φ in the soil, the angle between the fracture surface and the large principal stress action surface during soil shear failure is $45^\circ + \varphi/2$. Gap grouting, slope reinforcement, and excavation backfilling are effective measures for dealing with cracks in embankment pavement, which can reduce the gaps between soil particles, increase the overall strength and stability of the embankment, and improve the overall safety performance of the embankment.

Key words: Yangtze River embankment; transverse cracks; longitudinal cracks; shear stress; internal friction angle

河道堤防具有防御洪水泛滥、限制分洪区与行洪区淹没范围、抵御风浪或海潮、约束河道和控制河流走势等作用, 是最早广为采用的水利工程措施。河道堤防可能出现的险情一般分为渗水、管涌流土、漏洞、滑坡、裂缝、塌陷(跌窝)、漫溢等几种,

其中裂缝是常见的一种险情, 同时也是其他多种险情发生的先兆^[1-2]。河道堤防裂缝的种类与成因较为复杂多样, 需要依据工程具体情况采取相应措施, 及时消除安全隐患, 保障河道工程安全。近年来, 许多学者对堤防及路面裂缝产生的原因及处理

收稿日期: 2024-05-15

基金项目: 南京市水务科技项目(202301)

作者简介: 薛子龙(1993—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程运行管理工作。E-mail: 1587637223@qq.com

方法进行了研究:赵道双等^[3]对句容市赤山湖堤防道路纵向裂缝成因进行了分析,并提出了堤身培厚、裂缝填实封闭、开挖回填等处理方法;谷跃辉^[4]阐述了东莞大堤出现龟裂缝、纵向裂缝与横向裂缝的原因,通过裂缝试验,对堤身结构与渗透破坏、软土的特性及堤基失稳的破坏机理进行了分析;田建平^[5]对沥青路面裂缝成因进行了总结分析,包括热胀冷缩应力、动态荷载应力、施工工艺不合格及外界环境因素影响几种,同时提出了路面裂缝预防防治措施;王晗^[6]通过物理作用下力学试验对比与FLAC 3D仿真计算方法,对堤防黏土力学特性与边坡稳定性进行了研究,结果表明干湿与冻融作用会影响堤防边坡安全稳定性。

长江南京段两岸堤防总长266 km,包括主江堤、港堤、洲堤与以山代堤段,其中主江堤长度179 km,占堤防总长67.3%。在2019—2023年的长江堤防南京段省级与市级维修工程项目中,因裂缝引起的堤防路面累计维修长度约2.2 km,总维修经费在省市级堤防维修工程所有项目中占较大比重。本文以长江堤防南京段为例,对堤防裂缝的种类与成因进行阐述分析,并提出了不同裂缝类型的处理措施,能够有针对性地消除堤防安全隐患,发挥堤防安全与经济效益,同时为类似河道堤防裂缝处理提供参考依据。

1 裂缝种类

堤防裂缝种类较多,按照形成原因分类,有塑性坍塌与收缩裂缝、沉降裂缝、温度裂缝、应力集中裂缝、构造裂缝等;按照开度大小分类,有微缝(<1 μm)、小缝(1~10 μm)、中缝(10~100 μm)与大缝(>100 μm);按照深度分类,有浅表裂缝(<10 cm)、中层裂缝(10~50 cm)与深层裂缝(>50 cm);按照走向分类,有龟裂缝、横向裂缝与纵向裂缝。上述裂缝种类相互交叉,在工程实际应用中发现的裂缝往往同时包含多种类型。

在历次长江河道堤防管护巡查及检修中发现,纵向裂缝与横向裂缝是长江堤防南京段裂缝的最主要类型,且大多数属于中深层裂缝与中大缝。纵向裂缝是指走向平行于堤防路面中线的缝,长度可达10~80 m,缝宽在0.3~0.8 cm之间,深度可达10~100 cm,一般是由滑坡与路面压载引起;横向裂缝是指走向垂直于堤防路面中线的缝,长度在6~8 m之间,缝宽在0.2~0.5 cm之间,深度5~20 cm,一般是由路基不均匀沉降与温度应力引起。

2 裂缝成因分析

长江堤防南京段主江堤堤身绝大多数为土堤,其余少部分主江堤为混凝土防洪墙。土堤堤顶路面由4 cm厚细粒式沥青混凝土与8 cm厚中粒式沥青混凝土组成,路基土壤成分主要为粉质黏土,压实度在0.95~0.98之间,相对密度在2.72~2.76之间。堤身及路面产生裂缝的原因主要是由于堤防内部存在应力变化,本文对常见的自重应力、剪切应力与温度应力产生原因及破坏机理进行分析。

2.1 土壤自重应力

堤防地基土中通常存在地下水,因此各土层与天然土层相比具有不同的力学特性,计算堤防土壤自重应力时应以地下水位面作为分层界面,如图1所示。地下水位以下的砂性黏土或粉质黏土需要考虑浮力作用,地基中深度 z 处的竖向自重应力计算方式^[7]为

$$\sigma_{cz} = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 + \cdots + \gamma_n H_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \quad (1)$$

式中: σ_{cz} 为天然地基下任意深度处的竖向自重应力,kPa; n 为深度 z 范围内的土层总数; H_i 为第 i 土层的厚度,m; γ_i 为第 i 土层的天然重度,kN/m³。

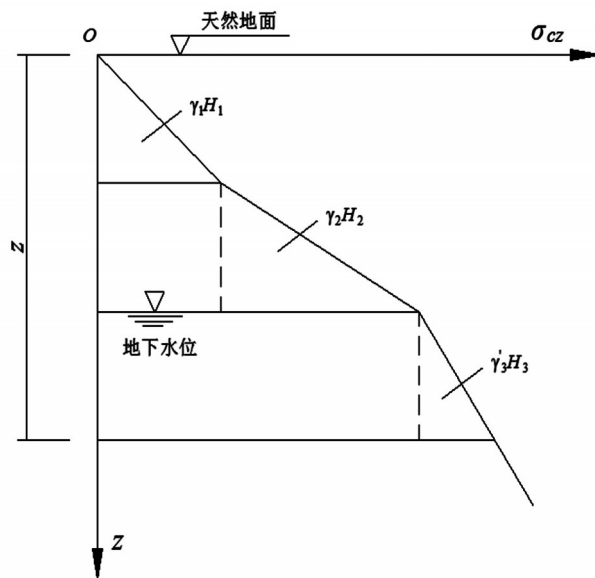


图1 成层土中的竖向自重应力

地下水位的升降会引起土中自重应力的变化,如果地下水位长期处于较低位置,地基中原水位以下的土层浮力变小,土壤颗粒自重应力增大,会造成地面大面积下沉;同时堤防上方土层含水率过低,土壤颗粒之间的黏结力变小,会引起土层开裂。

2.2 土壤剪切应力

土壤是由固体颗粒组成的,土壤颗粒之间的联结强度远远小于土粒自身的强度,当有外力作用时,土壤颗粒之间会产生相互滑动的趋势,此时土粒之间相互错动的力为剪切应力。将土壤颗粒视为六面微单元体,单元体3个主应力均不为零时,该单元体即处于三向应力状态。根据莫尔—库伦强度理论^[8],此时的单元体可用莫尔应力圆来分析为单元体受到的正应力与剪切应力,如图2所示。

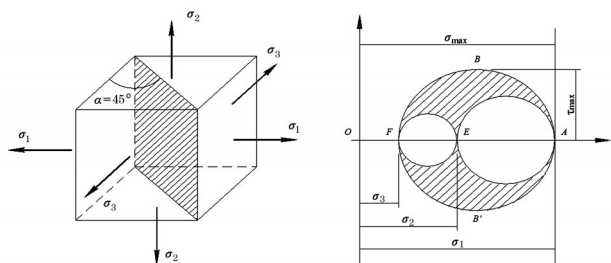


图2 三向应力状态及其应力

图2中微单元体应力方向朝外表示拉应力,符号为正;应力方向朝内表示压应力,符号为负。当微单元体处于三向应力状态时,该点处的最大正应力为 σ_1 ,最小正应力为 σ_3 ,该点处的最大切应力作用在与 σ_2 主平面垂直并与 σ_1 和 σ_3 所在主平面呈 45° 的截面上,其计算方式为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

式中: τ_{\max} 为最大切应力, N/m^2 ; σ_1 为最大正应力, N/m^2 ; σ_3 为最小正应力, N/m^2 。

在实际堤防工程应用中,堤身通常由粉质黏土或砂性黏土组成,土壤颗粒之间存在内摩擦角,这时土体剪切破坏时的破裂面与大主应力作用面的角度计算方式为

$$\alpha_f = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

式中: α_f 为剪切破坏面与大主应力作用面之间夹角; φ 为土壤内摩擦角,通过试验得到。

当堤防发生不均匀沉降时,由于土壤属于塑性材料而沥青路面属于脆性材料,在沥青路面的下方会形成一定体积的脱空区,路面在重力荷载作用下,就容易发生剪切破坏,形成裂缝^[9]。根据式(2)可知,车辆、重物堆载及其他荷载作用在堤防路面上,土壤内部最小正应力 σ_3 表现为压应力,数值为负,此时土壤的最大剪切应力变大。土壤的抗剪强度与土壤粒径分布、含水量、软硬强度等因素相关,土粒之间的剪切应力超过一定数值时,土样将发生

剪切破坏,从而发生滑动位移,在堤防工程上通常表现为滑坡、裂缝。

2.3 土壤温度应力

堤防土壤及路面沥青体积会随温度升降产生膨胀与收缩,从而在堤防内部会产生相应的温度应力,如图3所示。温度上升引起土壤及沥青颗粒体积变大,颗粒之间缝隙变小,从而相互挤压产生压应力;温度下降时引起土壤及沥青颗粒体积变小,颗粒之间缝隙变大,从而相互拉伸产生拉应力。

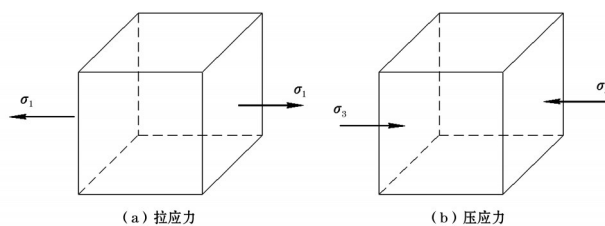


图3 温度升降引起应力

微单元体产生拉应力时,应力方向朝外,数值为正,纵向主应力为 σ_1 ;微单元体产生压应力时,应力方向朝内,数值为负,纵向主应力为 σ_3 ;由于堤防宽度、高度与其长度相比相对较小,因此横向与竖向的温度应力可忽略不计。堤防沥青路面反复受拉压应力影响,且在路面重物荷载及地面震动作用下,沥青路面易发生脆性断裂,形成横向裂缝,同时雨水容易通过裂缝向下渗透,冲刷路面下方土壤颗粒而造成集料流失。

3 裂缝处理方法

堤防路面产生裂缝后,需要对堤防进行及时加固,否则裂缝将会逐渐变宽变深,进而造成堤身开裂,同时雨水会沿着裂缝深入堤防内部,降低堤防内部土层抗剪强度,影响堤防整体安全性能。根据裂缝类型及产生的原因,工程实际应用中一般采取缝内灌浆、护坡加固、开挖回填等措施处理堤防路面裂缝。

3.1 缝内灌浆

对于堤防路面的浅表层裂缝,可采取充填灌浆或自流灌浆的方式对其进行填充。灌浆前应顺着纵缝方向对路面进行开槽,槽深与槽宽一般在 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 之间,然后通过注浆管加压或直接倒入稀浆液,直至裂缝填满为止。

对于堤防路面的中深层裂缝,可通过高压旋喷桩的方式在堤防内部形成一道密实的混凝土防渗

墙,从而达到填充缝隙、提高堤防整体强度的目的。在采用高压旋喷桩灌浆之前,应进行高喷成桩现场试验,通过先导孔对地基、施工条件进行排查复核;灌浆时应密切关注喷射压力与流量、提升速度、旋转速率等参数,并进行记录;注意灌浆搭接宽度、间隔时间与施工工序,完工后及时进行墙体强度检验。

3.2 护坡加固

因雨水冲刷导致的水土流失会导致堤防边坡失稳,土壤的抗剪强度变低,容易造成路面纵向裂缝与坡面塌陷产生,因此需要对产生裂缝的堤段护坡进行加固,通常有草皮种植、减小坡度、铺设切块或现浇混凝土等方式。

(1)草皮种植。草皮在生长过程中,可以在地表形成茂密的根系和茂盛的叶片,增加了土壤的粘结力和黏着力,可有效阻止土质颗粒流失,减缓坡面侵蚀速度,保护坡面土壤。

(2)减小坡度。堤防坡面角度 β 在 $0\sim\pi/2$ 范围内时,堤防坡度越大,堤防土壤自重及路面车辆、堆载荷载在坡面方向上的剪切应力随之增加,如图5所示。如果堤防坡面剪切应力超过土壤抗剪强度,堤防容易发生滑坡灾害,因此要将堤防坡度保持在合理范围内。长江堤防南京段迎水面坡面采用现浇混凝土,坡度比为1:3;背水面坡面为草皮护坡,坡度比为1:2.5。

(3)铺设砌块。雨水天气时,桥梁、渡槽、管道、线缆等跨堤建筑物上的降水容易汇聚成流量较大的水流,水流长期反复冲击护坡,导致草皮损坏从而失去保护堤防坡面能力,堤防坡面会出现水土流失和雨淋沟现象。这既削弱了边坡稳定性,被冲刷走的泥土也会堵塞堤防戕台与堤脚排水沟,影响堤防排水效果。可以将浆砌石、烧制砖等抗水流冲击能力强的材料铺设在堤防坡面上,下面依次铺垫素混凝土垫层、碎石,增加堤防坡面稳定性和抗冲刷能力。

3.3 开挖回填

如果堤防路面开裂严重,采用充填灌浆效果不明显,就需要沿裂缝方向将原有土体开挖置换,开挖宽度为1.5 m,挖至裂缝深度处。土方填筑前,应根据涂料情况在现场进行施工试验和标准击实试验,取得最优含水率等施工参数,确定有效压实厚度、压实遍数、施工方法等。回填土方含水率与最优含水率偏差控制在3%以内,回填土料为黏性土,

采用履带式拖拉机碾压,每30 cm厚压实1遍,压实度不小于0.95。土方回填后,依次铺垫200 mm厚石灰土、400 mm厚6%水泥稳定碎石、80 mm厚中沥青混凝土、40 mm厚细沥青混凝土。施工完成后,对路面进行随机钻孔取样,检验沥青混凝土厚度与强度是否满足设计要求。

4 结 论

(1)长江堤防南京段路面裂缝主要为横向裂缝与纵向裂缝,横缝长度在6~8 m之间,缝宽在0.2~0.5 cm之间,深度在5~20 cm之间,主要由于堤防地基不均匀沉降及温度膨胀收缩应力引起;纵缝长度在10~80 m之间,缝宽在0.3~0.8 cm之间,深度可达10~100 cm,主要是由于滑坡与路面荷载造成的剪切应力引起。

(2)堤防内部地下水位以下土体中存在浮力,地下水位长期较低会造成堤防路面下沉与土层开裂;堤防路面有车辆荷载及重物压载、地基发生不均匀沉降时,堤防易发生剪切破坏;堤防内部由于土壤颗粒之间存在内摩擦角 φ ,土体剪切破坏时的破裂面与大主应力作用面的角度为 $45^\circ+\varphi/2$ 。

(3)堤防路面裂缝处理方法有缝隙灌浆、护坡加固、开挖回填等,这些方法能够减小土壤颗粒之间的缝隙,增加堤防的整体强度和稳定性,提高堤防的整体安全性能。

参考文献:

- [1] 沈碧哲. 北沙河堤防裂缝与塌陷对堤防安全影响分析[J]. 水利技术监督, 2023(2): 4-6, 29.
- [2] 张士平, 师昀巍, 罗先启. 堤防裂缝成因及加固方案优化研究[J]. 结构工程师, 2021, 37(6): 208-214.
- [3] 赵道双, 叶根苗. 句容市赤山湖堤防道路纵向裂缝成因分析与治理[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(3): 19-25.
- [4] 谷跃辉. 东莞大堤堤防工程裂缝成因分析[J]. 山西水利, 2021, 37(3): 29-32.
- [5] 田建平. 沥青路面裂缝成因及防治措施分析[J]. 运输经理世界, 2024(8): 116-118.
- [6] 王晗. 不同物理作用下河道堤防黏土力学特性及边坡稳定性研究[J]. 水利建设与管理, 2023, 43(5): 36-41, 47.
- [7] 代国忠, 顾欢达. 土力学与基础工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.
- [8] 徐道远, 黄梦生, 朱为玄, 等. 材料力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004: 137-138.
- [9] 张业. 装配式水泥混凝土路面结构与材料研究[D]. 开封: 河南大学, 2021.