

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240607001

水位变化下盾构并行施工对大堤稳定性影响分析*

豆小天¹, 董军¹, 刘维正², 师嘉文², 谭际鸣²

(1. 中铁隧道集团二处有限公司, 河北 三河 065201; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:为研究沿江地区水位变化下管廊盾构施工产生的地层扰动对既有大堤安全性的影响,以安庆市沿江东路堤下段盾构并行安庆长江大堤为背景,首先对实测数据进行分析,得到大堤变形的基本规律;再建立盾构并行既有大堤三维流固耦合数值模型,研究盾构与大堤间距 S 、水位 H 对大堤两侧稳定性、不同部位(堤顶、堤底)变形以及地表水平位移的影响规律。结果表明,数值模拟中大堤不同部位沉降与现场实测所呈现规律相同;数值模拟显示 S 、 H 均对大堤渗透稳定性有较大影响,背水堤坡抗滑稳定性受 S 影响较大而迎水堤坡受 H 影响较大;在36 m间距条件下,水力梯度 J 随 H 呈线性变化,变化幅度为0.21/m,盾构穿越后 J 增大6.1%,迎水堤坡安全系数 F_s 增大而背水堤坡减小,且水位越高 F_s 减小的幅度越大;在间距24 m和12 m条件下,盾构穿越后 J 增大12.8%、17.9%, H 大于17 m时背水堤坡不满足抗滑要求;控制 S 于24~36 m,可以满足不同水位情况下施工安全; S 对堤顶变形有明显影响, H 对堤脚变形有明显影响;背水侧地层水平位移最大点位随水位升高而靠近地表,迎水侧地层水平位移最大点位始终发生在地表。研究成果可为类似工程设计及施工安全提供参考。

关键词: 盾构隧道; 堤防稳定; 数值模拟; 流固耦合; 实测分析

中图分类号: U455.43 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2026)02-0419-11

Analysis of Influence of Shield Tunnel Parallel Construction on River Levee Stability under Fluctuating Water Levels

DOU Xiaotian¹, DONG Jun¹, LIU Weizheng², SHI Jiawen², TAN Jiming²

(1. China Railway Tunnel Group No.2 Engineering Co., Ltd., Sanhe 065201, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: This study aims to investigate the influence of stratum disturbance induced by utility tunnel shield tunnelling under varying water levels in riverside areas on the safety of existing river levees. The section of the Anqing Yangtze River levee along Yanjiang East Road in Anqing City, where a shield tunnel was constructed in parallel with the existing levee, was taken as the study background. First, field measurement data were analyzed to obtain the basic deformation patterns of the river levee. Then, a three-dimensional fluid-structure interaction numerical model of the shield tunnel parallel to the existing river levee was established to investigate the effects of the shield-levee distance S and water level H on the stability of both sides of the river levee, the deformation of different parts (levee

* 收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-07-19

基金项目: 中铁隧道局集团科技创新计划(隧二研合2020-07)资助

作者简介: 豆小天(1982—), 男, 高级工程师。主要从事隧道及地下工程施工管理工作。E-mail: 22551786@qq.com

通信作者: 刘维正(1982—), 男, 副教授, 博士。主要从事交通岩土与城市地下工程研究。E-mail: liuwz2011@csu.edu.cn

crest and levee toe), and the horizontal displacement of the ground surface. The results showed that the settlement patterns at different parts of the river levee obtained from the numerical simulation were consistent with the field measurements. The numerical simulation showed that both S and H significantly affected the stability of river levee infiltration. The anti-sliding stability of the landside slope was more affected by S, while that of the waterside slope was more affected by H. At a spacing of 36 m, the hydraulic gradient J varied linearly with H, with a variation rate of 0.21/m. After shield tunnelling, J increased by 6.1%. The factor of safety Fs of the waterside slope increased, while that of the landside slope decreased, and the reduction in Fs became greater as the water level increased. At spacings of 24 m and 12 m, J increased by 12.8% and 17.9% after shield tunnelling, and the landside slope failed to meet the anti-sliding requirements when H exceeded 17 m. Maintaining S within 24 - 36 m ensured construction safety under different water levels. S significantly affected deformation at the levee crest, whereas H had a significant influence on deformation at the levee toe. The location of maximum horizontal displacement of strata on the landside moved closer to the ground surface as the water level increased, while that on the waterside always occurred at the ground surface. The findings provide a reference for the design and construction safety of similar projects.

Keywords: shield tunnel; river levee stability; numerical simulation; fluid-structure interaction; field measurement analysis

0 引言

随着新型城镇化方略的推动,城市道路改扩建已经成为提高城市道路通行能力、适应交通量增长的重要措施,城市规划和用地紧张等因素也使得城市道路改建工程与其它建筑物相邻近布置的情况越来越常见。沿江地区城市道路改扩建中,地下综合管廊施工方法主要明挖法^[1]和暗挖法^[2],由于汛期施工受限,保护防汛堤防等因素,管廊多采用盾构法施工。然而,盾构并行施工、江河水位变化会使大堤产生附加应力及渗流,对大堤稳定性造成严重威胁^[3-5]。因此,如何在保证盾构并行施工对既有大堤稳定性的影响是保证沿江地区道路改建工程质量的关键。

针对水位变化条件下盾构施工对既有大堤稳定性的研究,已有学者采用数值模拟、现场实测的方法做了大量的研究,并得出许多结论。现有研究大多将盾构引起既有建筑物变形归结为既有建筑物本身因素和盾构因素;戴轩等^[6]、姜忻良等^[7]建立三维数值模型,研究了既有建筑物长宽比、高度等因素对自身内力、变形的影响;张亚洲等^[8]、C. Liu等^[9]、H. Katebi等^[10]模拟了不同盾构埋深、掘进斜率、地层条件等因素对既有建筑物、桩群的影响;蒋

洪胜等^[11]、高超^[12]、黄海^[13]将理论计算、数值模拟结果与现场实测数据相对比,分析了地下水作用下,盾构下穿施工不同阶段对于堤防沉降的影响。在此基础上,黄戡等^[14]、沈建奇等^[15]、Y. Zhou等^[16]分别考虑流固耦合理论、非线性理论、强度折减理论,改进了计算方法,使盾构穿越引起的建筑物变形计算更为准确。除此之外,J. Jin等^[17]、Y. H. Lee等^[18]模拟了水位波动下大堤在不同地质条件下的沉降变形,并得出了水位快速变化会使得沉降积累从而导致大堤失稳的结论;I. Butera等^[19]建立二维饱和-非饱和土渗流模型,计算大堤失稳时的临界水位;L. Wang等^[20]、W. B. Zhang等^[21]分别通过集成多元自适应回归样条算法及多场耦合有限元分析分析法,研究了土体力学性质、渗透系数等指标对于大堤安全系数的影响,得出了土体力学性质对堤坝稳定性影响较大而渗透系数影响较小的结论。

基于以上研究可以看出,现有研究大多针对单一因素下大堤稳定性及变形的变化规律,且盾构穿越方式大多为下穿或侧穿,缺少水位变化与盾构长距离并行施工耦合作用下既有大堤稳定性变化规律的研究。为此,本文依托于安庆市沿江东路改建工程,选取盾构段典型剖面,先对实测数据进行分析,后建立盾构长距离并行既有长江大堤施工的三维流固耦合模型;对不同水位、盾构与大堤间距情

况下,并行施工对既有长江大堤稳定性的影响展开研究,以期为类似工程的开展及既有大堤稳定性评价提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

安庆市沿江东路改建工程位于安庆市迎江区,西起迎江区曙光路,东至经济技术开发区联兴路,全长 12.6 km,其中文苑路与顺安路之间为堤下道路,且为全线唯一挖方及低填方路段。原设计采用明挖法进行堤下段综合管廊施工,根据安庆市防洪要求,每年 4~10 月汛期期间不得进行基坑开挖,为保证施工工期及安全质量,同时保障大堤安全,改用盾构法施工方案。盾构区间管片外径 6 m,采用强度等级 C50 钢筋混凝土平板型管片,管片厚度 300 mm,管片外径 6 m,内径 5.4 m,宽度 1.5 m,掘进采用土压平衡盾构机,盾构线路设于沿江东路北向绿化带下,盾构区间示意如图 1 所示。

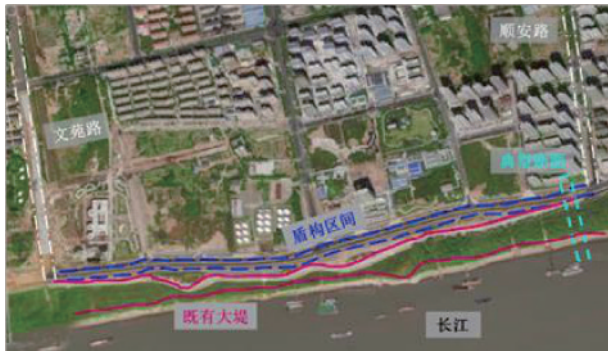


图 1 盾构区间示意

Fig.1 Schematic diagram of shield tunnel section

1.2 水文地质

据场地勘测报告,地层由上而下,总共分为 3 个地质层,分别为粉质黏土;淤泥质黏土;粉砂,土层渗透系数较大,透水能力较强,在盾构扰动下易发生管涌,流沙等现象。安庆市 2010 年-2020 年的月平均水位如图 2 所示,其中 12 月到次年 2 月为枯水期,4~10 月为汛期,水位高于 12 m 时为高水时期。根据安庆市历年来所监测到的水位值,设置四种水位如下:洪水水位 17.23 m、警戒水位 14.84 m、设防水位 12.34 m、枯水位 6.86 m,各水位以及盾构与大堤的位置关系及场地土层分布如图 3 所示。

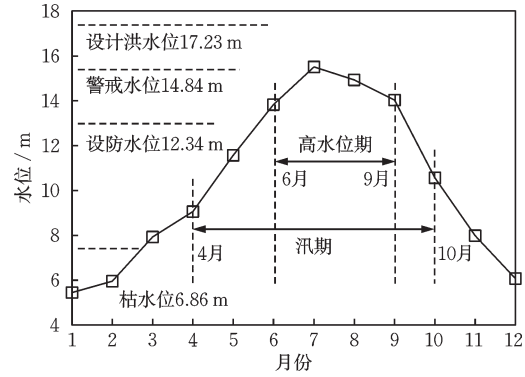


图 2 近十年月平均监测水位

Fig.2 Monthly average monitoring water level over past ten years

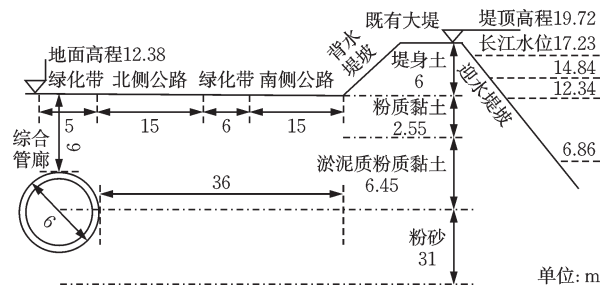


图 3 盾构与大堤位置示意

Fig.3 Schematic diagram of shield and river levee locations

2 实测数据分析

选取监测盾构区间内监测断面 K2+700,其与 大堤位置关系如图 4 所示,图 5 为监测断面 K+2700 中各监测点于 2021 年 6 月 3 日至 2022 年 7 月 16 日间的沉降曲线,其中盾构施工期为 2021 年 5 月 3 日至 2021 年 12 月 21 日。从图中可以看出,大堤背水侧堤顶的最终沉降最大,而大堤迎水侧堤顶最终沉降最小。

从曲线可以看出,盾构施工期及盾构完成后大堤各监测点的沉降值整体上都在降低。盾构施工期内,长江水位除盾构初期有上涨以外,其余施工过程中水位都在不断降低。盾构完成时,大堤背水侧堤顶沉降最大,为 -6.25 mm;盾构结束后一段时间内,水位没有明显变化,大堤各点位沉降趋于定值,随着水位的上升,大堤沉降继续增加,直至监测结束。在盾构完成后至监测结束,大堤背水侧堤顶沉降从 -6.25 mm 变为 -10.87 mm,增加了 4.62 mm 的沉降,其余点位的沉降呈现相同的规律,因此,水位升降以及盾构掘进都是造成大堤

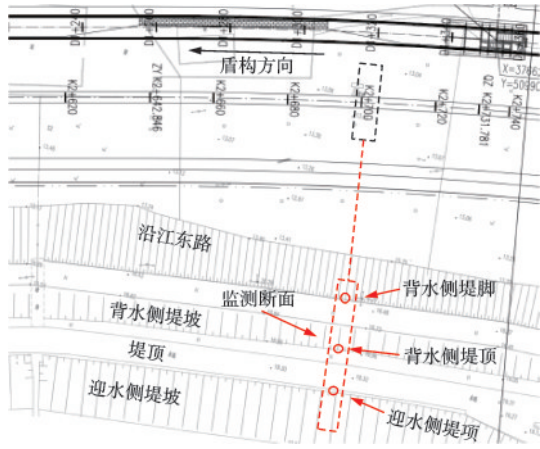


图4 监测断面与大堤示意

Fig.4 Schematic diagram of monitoring cross-section and river levee

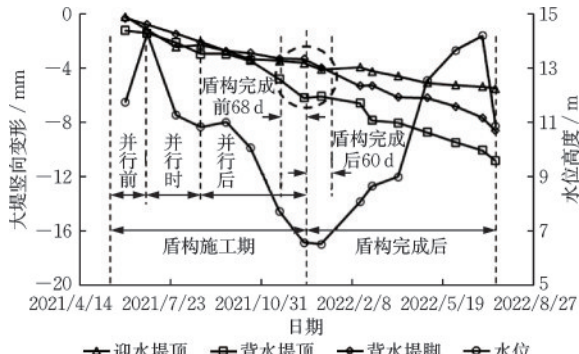


图5 K+2700截面沉降曲线

Fig.5 Settlement curves of K+2700 cross-section

沉降的原因。

2021年10月19日至2021年12月17日,68天内大堤背水侧堤顶沉降由-3.49 mm变为-6.25 mm,沉降变化了-2.76 mm;盾构结束后,2021年12月17日至2022年2月17日,60天内大堤背水侧堤顶沉降只变化了-0.38 mm;相较于堤顶,背水侧堤脚在盾构结束前68天沉降变化了-0.43 mm,但盾构完成后60天内沉降增加了-1.99 mm。可以得出,大堤不同部位对于盾构及水位影响的敏感性不同。

大堤背水侧堤顶总水头较高,堤脚的总水头较低,渗流发生时,孔隙水会流向水头较低的点位,因此,堤脚对于大堤水位的敏感性要明显高于大堤堤顶。大堤迎水侧堤顶距离盾构最远,且水头较高,因此受盾构及水位敏感度均较低,从图中可以看出,除盾构下穿K+2700产生较大沉降以外,总体上沉降较为均匀,由此可知,大堤迎水侧堤顶受盾构及水位敏感性较低,沉降较小。

3 盾构掘进模拟

3.1 数值模型建立

采用Abaqus有限元软件,对盾构并行既有大堤建立三维流固耦合模型,假设大堤坡度不变,模型边界一般取3~5倍盾构洞径为宜,又考虑实际情况中盾构与大堤的距离,因此取模型宽度为150 m,取120 m(80环管片宽度)作为模型的开挖长度,取地面以下36.71 m为模型的竖向深度,模型整体如图6所示。前、后、底部边界采用不透水边界,左、右边界采用透水边界,上部边界采用渗流自由边界,通过改变大堤迎水侧边界孔隙压力来模拟长江水位。模型的四周采用法向约束,底面全约束,顶面无约束。

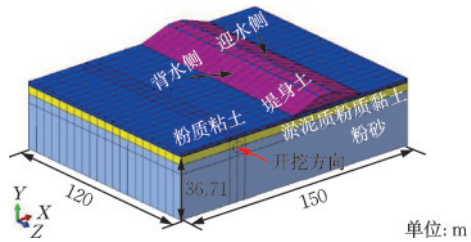


图6 三维流固耦合数值模型

Fig.6 Three-dimensional fluid-structure interaction numerical model

3.2 计算参数选取

土体选取摩尔库伦模型作为本构模型,其余材料选取线弹性模型,参照所依托工程的工程地质勘测资料以及盾构设计资料计算参数,如表1所示。

模拟中,为模拟注浆层的硬化过程,通过场变量的方法对注浆层设置初凝及终凝属性,并设置不同场,在不同分析步中改变温度场来改变浆液的弹性模量,从而实现浆液的凝固。

3.3 计算工况

模拟中假定盾构与大堤背水堤脚距离为 S ,实际工程中 $S=36$ m,另选取 $S=12,24$ m来研究盾构与大堤的间距对大堤的影响。

根据历年水位及水位与大堤位置情况,设置水位 H 为6~18 m进行分析,其中对低水位(6~12 m)每隔3 m设一工况,对高水位(12~18 m)中每隔1 m设一工况,对盾构掘进前后大堤稳定性进行分析。

表1 土体及盾构物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil and shield tunnel

名称	厚度/ m	重度/ (kN·m ⁻³)	含水率/ %	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比	弹性模量/ MPa	渗透系数/ (m·s ⁻¹)
堤身土	6	19.0	31.5	10	14	0.30	20	2×10 ⁻⁷
粉质黏土	2.55	19.5	30.5	10	14	0.26	20	8×10 ⁻⁷
淤泥质黏土	6.45	18.9	32.8	6	8	0.35	16	8×10 ⁻⁷
粉砂	31	19.5	22.4	5	25	0.30	19	7×10 ⁻⁵
注浆层(初凝)	0.1	22.0	—	—	—	0.25	1	—
注浆层(终凝)	0.1	22.0	—	—	—	0.25	100	—
盾壳	0.04	25.0	—	—	—	0.20	210 000	—
衬砌管片	0.3	24.5	—	—	—	0.20	34 500	—

为着重分析水位对大堤影响,对于大堤变形只进行高水位进行分析,具体模拟工况如表2所示。

表2 模拟工况表

Table 2 Simulation conditions

大堤稳定性分析				大堤变形分析			
工况	S/ m	H/ m	施工 状态	工况	S/ m	H/ m	施工 状态
1	36	6、9、12、13-18	盾构前	7	36	12	盾构后
2	36	6、9、12、13-18	盾构后	8	36	15	盾构后
3	24	6、9、12、13-18	盾构前	9	36	18	盾构后
4	24	6、9、12、13-18	盾构后	10	24	18	盾构后
5	12	6、9、12、13-18	盾构前	11	12	18	盾构后
6	12	6、9、12、13-18	盾构后	—	—	—	—

3.4 盾构掘进模拟

为使模型模拟前存在初始应力而无初始应变的状态,需进行自重应力的平衡,模拟前通过重复导入 odb 文件的方式实现自重应力的平衡,模拟时以4环衬砌管片宽度(6 m)为一个开挖步,通过Abaqus的生死单元功能实现土体开挖,对盾构隧道施工过程采用细致化动态模拟。共模拟掘进80环(120 m),开挖模拟示意如图7所示,具体的模拟步骤如下:

(1)移除第1部分土体单元,激活第1部分盾壳单元,同时对开挖面施加支护压力,并对第1部分开挖土体表面设置孔隙压力0。

(2)移除第2部分土体单元,激活第2部分盾壳单元,同时对第2部分开挖面施加支护压力;移除第一部分盾壳单元和支护压力,并且激活第1部分注浆层以及管片,同时对第1部分施加注浆压力,并对

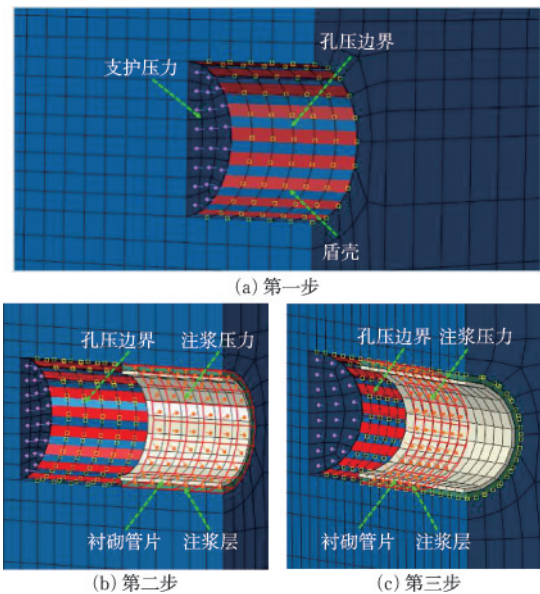


图7 盾构开挖步骤

Fig.7 Steps of shield excavation

第2部分开挖土体表面设置孔隙压力0。

(3)移除第3部分土体单元,激活第3部分盾壳单元,同时对第3部分开挖面施加支护压力;移除第2部分盾壳单元和支护压力,并且激活第2部分的注浆层以及管片,同时对第2部分施加注浆压力,并移除第1部分注浆压力,并对第3部分开挖土体表面设置孔隙压力0。

重复以上步骤,直至20个分析步完成。

模拟中注浆压力选取施工过程中平均值0.1 MPa,支护压力主要考虑开挖面中心的地层土压力与水压力之和,取80 kPa为支护压力;通过Abaqus自带功能,在管片-注浆层-土接触面的负向界面上设置地层损失,本文地层损失取0.2%。

4 模拟结果分析

4.1 数值模型验证

为验证数值模型的可靠性,选取盾构区间截面K2+500,根据盾构并行施工期,计算得施工期内长江水位平均值为11.78 m,并与数值模拟工况7的结果做对比,绘制盾构前后堤顶两侧沉降曲线对比如图8所示。可以看出,数值模拟略大于现场实测,这是由于数值计算所取水位平均值大于实际水位,且数值计算中忽略了大堤坡度的影响,但二者呈现的变化规律是相同的,验证了本文所建立数值模型的可靠性。

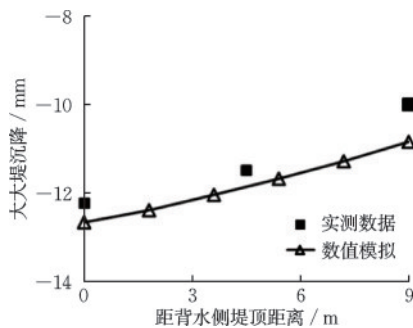


图8 K2+500截面实测与数值模拟对比

Fig.8 Comparison between field measurement and numerical simulation of K2+500 cross-section

4.2 大堤稳定性分析

大堤稳定性主要考虑渗透稳定性及堤坡抗滑稳定性。渗透稳定性是大堤在渗流情况下,由于大堤上下游在水头差作用下,大堤迎水侧江水通过堤基、堤肩,或堤体本身发生渗流,在堤身土中产生很大的渗透力,使得大堤内部级配较宽的颗粒流失,大堤产生“管涌”现象,对堤身造成渗流破坏。抗滑稳定性主要考虑大堤在附加应力及渗流作用下,造成大堤的边坡失稳。渗流会对颗粒骨架产生压力、浮力及拖拽作用,且渗流本身也会使土体的抗剪强度降低,影响边坡的稳定性。

为分析大堤渗透稳定性,利用判定土体渗透稳定性的水力准则 Terzaghi 准则^[22],计算高渗透区水力梯度、临界水力梯度与稳定性系数,其中土的临界水力梯度及水力梯度计算式为:

$$J_{cr} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1 \quad (1)$$

$$\gamma_{sat} = \gamma_d(1 + \omega) \quad (2)$$

$$J = dh/ds \quad (3)$$

式中, J_{cr} 为土的临界水力梯度; γ_d 为土的干重度; γ_{sat} 为土的饱和重度; ω 为土的含水率; J 为水力坡度; dh 为水头损失; ds 为流程长度。

为分析水力梯度,可以通过 Abaqus 输出场变量 FLVEL(孔隙流体的流速)来获得大堤中的渗流速度,通过 $v = kj$ 解出水力梯度,其中 k 为土体的渗透系数。

Abaqus 分析边坡抗滑稳定性常用的方法为强度折减法,边坡安全系数 F_s 定义为:当土体抗剪强度参数 c 和 φ 分别用其临界抗剪强度参数 c' 、 φ' 所代替后,堤坡将处于临界破坏状态。其中:

$$c' = c/F_s \quad (4)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/F_s)$$

Abaqus 中实现强度折减的过程为:将土体的粘聚力及内摩擦角按照式(4)不断折减,从而求出新的土体强度参数 c' 、 φ' ,再带入进模型,通过不断的改变折减系数 F_s ,反复计算分析边坡的受力变形,直到土坡达到极限状态,此时的折减系数 F_s 就是边坡稳定安全系数。

由式(1)~(3)计算可得大堤渗透稳定性评定指标临界水力梯度 J_{cr} 为 0.457;抗滑稳定性指标安全系数 F_s 根据《堤防工程设计规范》^[23] 要求, I 级堤防在正常运行工况下边坡抗滑安全系数分别不小于 1.50。

图9为大堤渗透及塑性应变云图,可以看出,迎水侧流速最大的地方位于大堤与水位线交界处,背水侧流速最大的地方位于堤底左侧堤脚处。提取各水位下大堤最大流速,利用流速求出各点处的水力坡度绘制大堤渗透稳定性指标水力梯度 J 及迎水堤坡、背水堤坡抗滑稳定系数 F_s 随水位变化曲线如图10所示。

考虑到高水位期(12~18 m)水位高于地表,而 12 m 水位以下地表高度高于水位线,故本节主要研究高水位对于大堤稳定性的影响。图10(a)显示,水力梯度与水位呈线性变化关系,增大幅度为 0.21/m,盾构后不同水位对应水力梯度增大 6%~19%,随着水位的升高,大堤两侧水头差会变大,导致渗流流速更大,因此大堤内部的水力梯度也会增大。因此高水位盾构期间应加强大堤的监测,防止盾构诱发大堤渗透破坏。

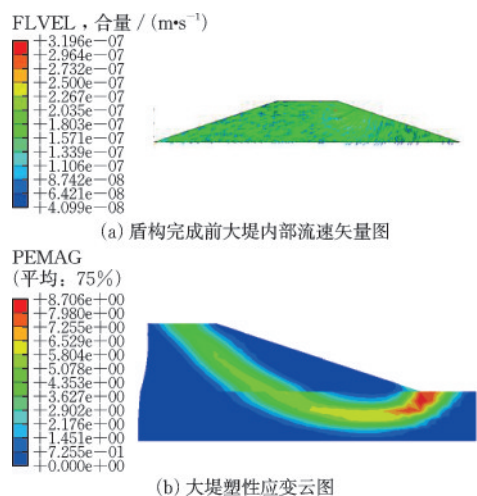


图9 大堤渗透及塑性应变云图

Fig.9 Contour maps of river levee infiltration and plastic strain

从图 10(b)和(c)中可得出,盾构后背水侧 F_s 会降低,而迎水侧 F_s 略微升高,这是因为盾构掘进改变了原有地层的应力场,对大堤整体产生指向盾构方向的附加应力,从而增大了背水侧的滑动趋势而降低了迎水侧的滑动趋势。高水位期间,水位每上升1 m,迎水堤坡盾构前抗滑安全系数分别减少了0.027、0.037、0.049、0.059、0.093,可见水位上升不仅使得 F_s 降低,且水位越高, F_s 降低的幅度越大,大堤背水侧 F_s 也呈现相同趋势,但由于大堤背水一侧渗流相对较少,故 F_s 随水位减少量较少,背水侧 F_s

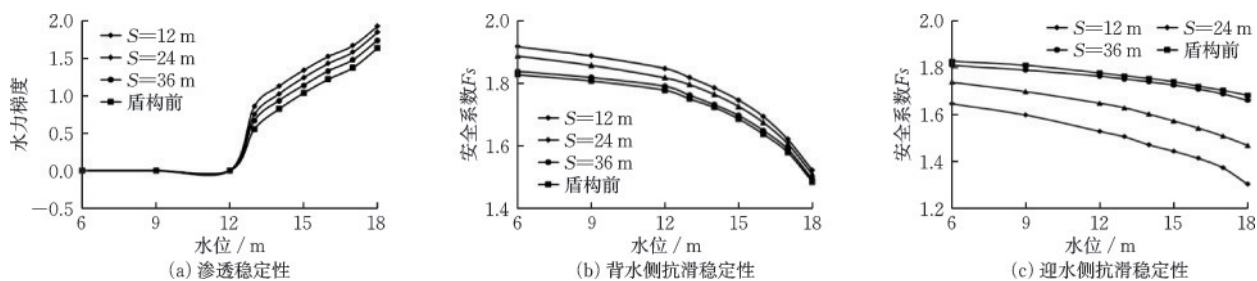


图10 不同S盾构前后大堤稳定性指标变化曲线

Fig.10 Variation curves of river levee stability indicators before and after shield construction under different S values

4.3 大堤变形分析

图 11 为大堤的变形云图,左侧为大堤背水面,右侧为大堤迎水面,大堤竖向变形由背水侧至迎水侧不断减小,水平变形由背水侧至迎水侧不断增大,最大沉降发生在大堤背水侧堤顶,其次为大堤背水侧堤脚,最小沉降发生在大堤迎水侧堤顶。

盾构前后差异比较明显。

盾构开挖后,地下水以及堤内水会由于水头差流向隧道内部,而盾构距离的减少会使得渗流更容易发生,从而使得大堤内部水力梯度增大,随着S的减少,大堤在同一水位下的最大水力梯度明显增加。计算可得,18 m水位条件下,三种S所对应水力梯度分别增大6.1%、12.8%、17.9%,可知S、H都是影响大堤渗透稳定性的主要因素。 $H=18$ m、S由36 m降低至12 m,背水侧 F_s 从1.66变化到1.30,变化了0.36;而 $S=12$ m, H 由13 m增大18 m, F_s 从1.50变化到1.30,变化了0.20,因此,S对于背水堤坡抗滑稳定性的影响明显大于H。另一方面,相同情况下,迎水边坡抗滑稳定性分别变化了0.05、0.31,因此,S对于迎水堤坡抗滑稳定性的影响明显小于H的影响。

计算结果显示,不同水位条件下,大堤与水位线交界处水力梯度均大于临界水力梯度,堤身及堤脚处水力梯度均小于临界水力梯度,说明大堤只有迎水侧发生局部管涌,而并未堤身内部形成通道,因此各工况下均满足渗透稳定性要求。大堤迎水侧在不同条件下均满足抗滑稳定要求;大堤背水侧在 $S=36$ m时所有水位均满足抗滑要求, $S=24$ m时, H 大于17 m时不满足抗滑要求, $S=12$ m时, H 大于13 m时,不满足抗滑要求。因此可得,控制S位于24~36 m,即可满足不同水位条件下大堤两侧堤坡抗滑稳定性。

盾构过程中,大堤变形主要是由于地层损失以及土体固结沉降所引起的,由于邻近盾构隧道施工的扰动,导致超孔压产生,土体总应力不变,而土体颗粒之间的有效应力增加,产生固结沉降。水位越高,土体中的孔隙水压力也就越大,产生的超孔压也会越大,固结沉降也就越大。

选取图 12 中大堤两侧堤底中心 AB 及堤顶两

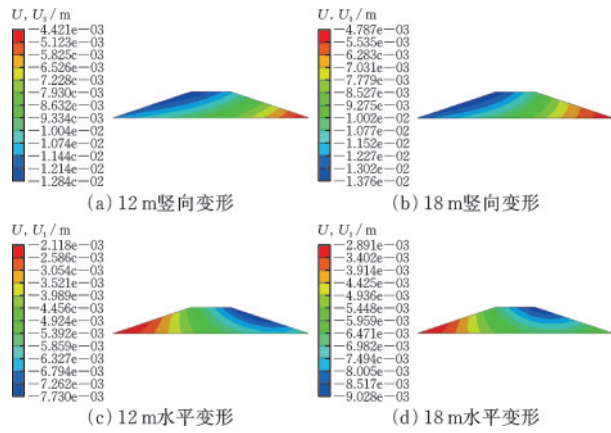


图 11 大堤变形云图

Fig.11 Contour maps of river levee deformation

侧中心 CD 作为研究对象,绘制其盾构开挖后的变形曲线,如图 13 所示。大堤堤顶及堤底的沉降值随水位的升高而增大,大堤最大沉降发生在 18 m 水位条件下大堤背水侧的堤顶处,最大沉降为 -13.76 mm,随着堤顶距离由 C 到 D 增加,沉降值减少,不同水位下 B 点沉降趋于一致。 H 对应 12、15、18 m 时,最大沉降分别为 -12.84 、 -13.10 、 -13.76 mm,增大了 3.42%、3.94%。堤底的沉降随着 H 上升呈现与堤顶沉降相同的趋势,增幅分别为 5.01%、8.07%,这与实测数据中堤底对水位变化的敏感性高于堤顶的规律一致。可以看出,水位变化引起的沉降会随水位增大而增大,且幅度也会增大,因此在施工的过程中应注意水位,防止汛期水位骤升或是骤降易造成大堤沉降剧增,从而导致大堤决堤。

大堤堤顶水平位移呈线性变化,图中负号代表位移指向管廊方向,堤底则呈“s”形变化; H 越大,堤

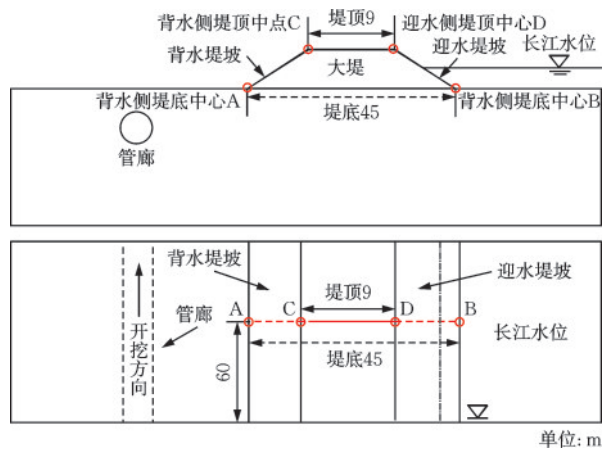


图 12 选取研究对象示意

Fig.12 Schematic diagram of selected research objects

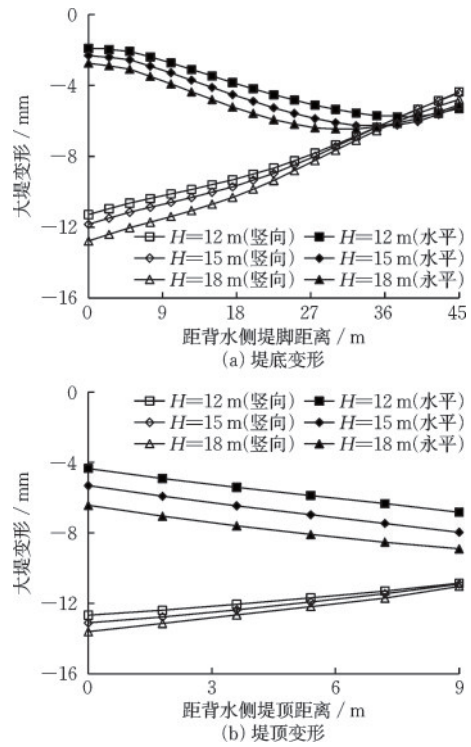


图 13 不同 H 条件下大堤变形曲线图

Fig.13 Deformation curves of river levee under different H conditions

底最大水平位移越靠近 B 点,横向位移越大也会随 H 增大而增大。由于大堤中孔隙水会由孔隙压力较高的一侧流向孔隙压力较低的一侧,水位较高时,土体中的渗透力也会较大,对大堤产生的水平位移也就更大。随着 H 的上升,堤底最大水平位移分别增大了 8.62%、3.01%,堤顶水平位移则增大了 16.57%、11.95%,因此水平位移会随水位增大而增大,但增大幅度越来越小。

为进一步分析不同 S 情况下大堤变形规律,绘制 S 在 $H=18$ m 时大堤变形曲线如图 14 所示,从图中可以看出,随着 S 的缩短,堤顶、堤脚的沉降变化较大,盾构距离为 24、12 m 时,大堤最大沉降分别为 -15.78 、 -17.32 mm,相对于初始盾构距离情况下,分别增大了 16.03%、27.35%。最大水平位移发生在迎水侧堤顶处,盾构距离为 24、12 m 时,大堤最大水平位移为 -10.06 、 -12.36 mm,相较于初始盾构距离,增大了 11.32%、36.42%。结合图 13 的变化曲线可知, S 、 H 都是引起大堤变形的主要因素。

4.3 深层土体水平位移

此外,地层水平位移也是造成大堤失稳的重要

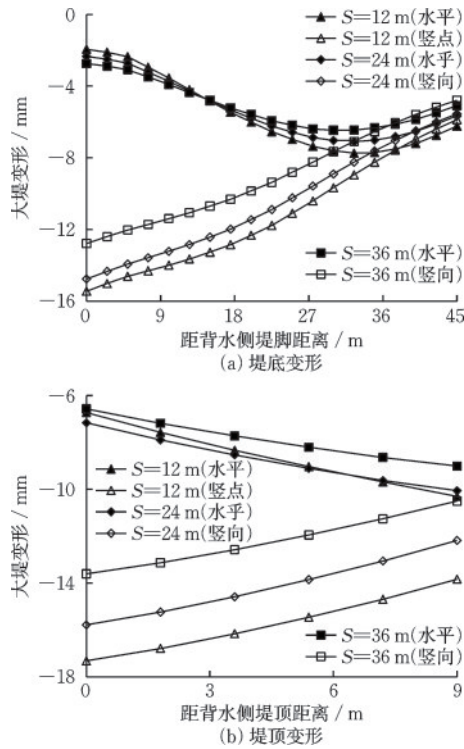


图 14 不同 S 下大堤变形

Fig.14 Deformation curves of river levee under different S conditions

因素,选取图 12 断面绘制大堤两侧中心堤脚下部土层水平位移曲线,如图 15 所示。从曲线中可看出,背水侧水平位移自地表向下呈现先增大后减小的趋势,最大水平位移发生在盾构水平轴线附近,迎水侧水平位移自地表向下不断减小,两侧的水平位移减少速率均会在管廊轴线附近发生变化。

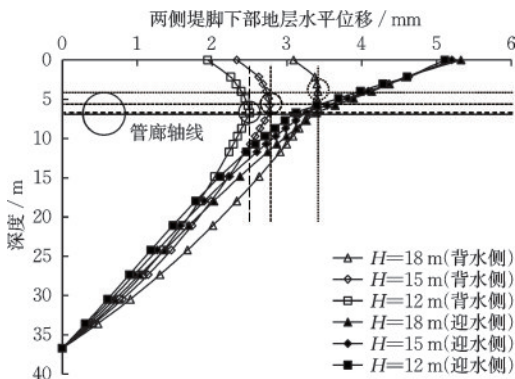


图 15 不同 H 地层水平位移变化图(S=36 m)

Fig.15 Horizontal displacement variation of strata under different H values (S=36 m)

对于背水侧, H 为 18 m 时地层水平位移最大值为 3.10 mm, 发生在地表以下 4.98 m; 水位 15 m 时, 地层的最大水平位移为 5.76 mm, 对应深度为

5.80 m; 当水位为 12 m 时, 地层的最大水平位移为 2.50 mm, 对应深度为 8.71 m。由此可见, 水位上升不仅会增大地层的水平位移, 也会使地层水平位移最大值越来越靠近地表。相较于背水侧, 迎水侧下部地层水平位移受水位影响较小, 随着土层深度的增大, 土层各个深度的水平位移也在不断减少, 当土层深度位于管廊轴线处时, 水平位移的变化速率会发生突变, 且变化速率减少, 趋向于与大堤背水侧相同的变化速率。

图 16 为水位 18 m 时不同距离 S 于条件下大堤两侧堤底下部土层的水平位移变化曲线。从图中可以看出, 在 18 m 水位条件下, 不同 S 的背水侧堤底最大位移均发生在埋深 5 m 处, 这也验证了图 13 中 H 会影响背水侧地层最大水平位移深度的结论。随着 S 的减少, 大堤背水侧土层的水平位移也会减少, S 为 12、24、36 m 时, 大堤背水侧地层最大水平位移分别为 2.42、3.05、3.41 mm。而迎水侧则与背水侧呈现相反的趋势, 盾构距离为 12、24、36 m 时迎水侧地表最大水平位移为 6.3、5.8、5.1 mm。可见, S 缩短会造成迎水侧地层水平位移增大, 背水侧土层水平位移减小。

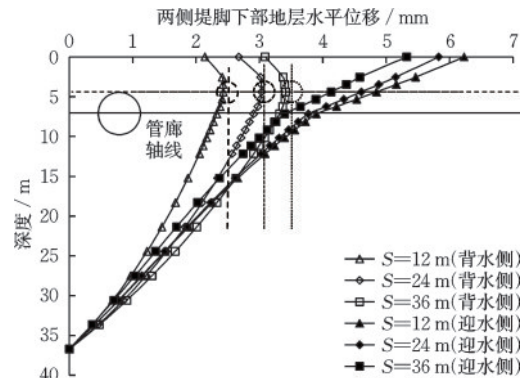


图 16 不同 S 地层水平位移变化图(H=18 m)

Fig.16 Horizontal displacement variation of strata under different S values (H=18 m)

5 结论

本文先通过现场实测数据分析, 得出了大堤不同部位沉降的基本规律, 再建立三维流固耦合数值模型, 研究水位 H、盾构与大堤间距 S 对大堤稳定性及变形影响规律。得出以下结论:

(1) H、S 都是影响大堤渗透稳定性的重要因素, S 为 36 m 时, 13~18 m 水位对应盾构前后大堤

渗透稳定性指标水力梯度分别增大6.1%~19.7%; H 为18 m时, S 对应36、24、12 m盾构前后水力梯度分别增大6.1%、12.8%、17.9%。

(2)迎水堤坡 F_s 受 H 的影响较大,而背水堤坡 F_s 受 S 的影响较大,两岸堤坡 F_s 变化幅度随 H 、 S 增大而增大。控制 S 大于24 m能有效保证各水位下大堤渗透稳定性及抗滑稳定性。

(3)大堤竖向变形主要集中在背水侧,而水平变形主要集中在迎水侧,其中堤顶变形对 S 变化敏感,而堤脚变形对 H 变化敏感。

(4)大堤背水侧地层水平位移随 S 减少而减小,迎水侧地层则呈相反的规律;背水侧地层水平位移最大值位于管廊轴线附近,且随着水位上升,会越来越靠近地表;迎水侧地层水平位移最大值位于地表。

参考文献:

- [1] 于素慧,耿永常.明挖法地下工程近接既有建筑施工影响分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增1):266-277.
Yu S H, Geng Y C. Influence analysis on underground approaching adjacent buildings construction with cut and cover method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup1): 266-277. (in Chinese)
- [2] 段亚刚.小直径盾构在综合管廊建设中的关键技术研究[J].铁道工程学报,2017,34(4):65-69.
Duan Y G. Research on the key technology of small diameter shield machine in municipal comprehensive pipe gallery [J]. Journal of railway engineering society, 2017, 34(4): 65-69. (in Chinese)
- [3] 朱牧原,魏力峰,方勇,等.超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降分析与控制研究[J].现代隧道技术,2022,59(3):211-219.
Zhu M Y, Wei L F, Fang Y, et al. Analysis and control of the settlement of super-large diameter shield tunnel passing under the Yellow River Embankment [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 211-219. (in Chinese)
- [4] 罗富荣,刘赅炜,韩焯.地下水水位上升对地铁隧道结构的影响分析[J].中国铁道科学,2011,32(1):81-85.
Luo F R, Liu C W, Han X. Numerical analysis on the influence of the rising groundwater level on the metro tunnel structure[J]. 2011, 32(1): 81-85. (in Chinese)
- [5] 葛世平,谢东武,丁文其,等.盾构穿越保护建筑数值模拟预测与监控量测[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(10):1463-1467.
Ge S P, Xie D W, Ding W Q, et al. Simulation and monitoring of shield tunnel undercrossing historic building [J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2011, 39(10): 1463-1467. (in Chinese)
- [6] 戴轩,郭旺,程雪松,等.盾构隧道平行侧穿诱发的建筑纵向沉降实测与模拟分析[J].岩土力学,2021,42(1):233-244.
Dai X, Guo W, Cheng X S, et al. Field measurement and numerical analysis for evaluating longitudinal settlement induced by shield tunneling parallel to building [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 233-244. (in Chinese)
- [7] 姜忻良,崔奕,赵保健.盾构隧道施工对邻近建筑物的影响[J].天津大学学报,2008,41(6):725-730.
Jiang X L, Cui Y, Zhao B J. Influence of shield tunnel construction on neighboring building [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(6): 725-730. (in Chinese)
- [8] 张亚洲,夏鹏举,朱伟,等.南京纬三路过江通道盾构穿越长江堤岸地层变形及稳定性分析[J].现代隧道技术,2015,52(4):151-157.
Zhang Y Z, Xia P J, Zhu W, et al. Analysis of stratum deformation and stability: A case study of the Nanjing Weisan Road River-Crossing tunnel passing under the Yangtze River Embankment [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(4): 151-157. (in Chinese)
- [9] Liu C, Zhang Z, Regueiro R A. Pile and pile group response to tunnelling using a large diameter slurry shield-Case study in Shanghai [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 59: 21-43.
- [10] Katebi H, Rezaei A H, Hajjalilue-Bonab M, et al. Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 67-78.
- [11] 蒋洪胜,侯学渊.盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1514-1520.
Jiang H S, Hou X Y. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1514-1520. (in Chinese)
- [12] 高超.软土地区盾构隧道掘进对周围土体及建筑影响的研究[D].天津:天津大学,2014.

- Gao C. Study on the influence of shield driven machine on surrounding soil and adjacent buildings in soft ground shield tunnelling [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [13] 黄海. 大直径盾构施工引起的钱塘江大堤沉降研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
Huang H. Research on The Qiantang River embankment settlement caused by the large-diameter shield construction [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 黄戡, 孙逸玮, 杨伟军, 等. 基于渗流应力耦合的盾构隧道开挖对邻近桥梁桩基的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52(3): 983-993.
Huang K, Sun Y W, Yang W J, et al. Influence of shield tunneling on pile foundation of adjacent bridge using fluid-soil coupling theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 983-993. (in Chinese)
- [15] 沈建奇, 金先龙. 基于并行计算的盾构机过大堤三维数值模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1296-1300.
Shen J Q, Jin X L. Three dimensional numerical simulation of shield tunneling through flood levee based on parallel computing [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(8): 1296-1300. (in Chinese)
- [16] Zhou Y, Qi S C, Fan G, et al. Topographic effects on three-dimensional slope stability for fluctuating water conditions using numerical analysis [J]. Water, 2020, 12(2): 615-639.
- [17] Jin J, Tamang B, Lee S, et al. A study on behavioral characteristics of core-based embankment subjected to variable water level fluctuation rates [J]. International Journal of Civil Engineering, 2022, 20(4): 433-444.
- [18] Lee Y H, Park S Y, Tokida K I, et al. Three-dimensional seepage characteristics of reservoir river levee considering interval of horizontal filter [J]. International journal of offshore and polar engineering, 2018, 28(1): 80-86.
- [19] Butera I, Climaci M, Tanda M G. Numerical analysis of phreatic levels in embankment due to flood events [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590(4): 125382.
- [20] Wang L, Wu C, Gu X, et al. Probabilistic stability analysis of earth embankment slope under transient seepage using multivariate adaptive regression splines [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 2763-2775.
- [21] Zhang W B. Multifield coupling numerical simulation of the seepage and stability of embankment on deep overburden layers [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 47(6): 7293-7308.
- [22] Terzaghi K. Soil mechanics: A new chapter in engineering science [J]. Journal of Institution of Civil Engineers, 1939, 12: 106-141.
- [23] 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

(本文编辑: 苏泽云)