

隧道穿越段长江大堤渗流稳定性分析

孔庆宇¹, 马希磊¹, 王婷婷²

(1. 交通部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要: 某长江隧道盾构机穿越江北大堤后, 堤身出现裂纹且累计沉降较大, 工程采用深层搅拌桩对堤身进行加固。为了检验深层搅拌桩对长江大堤堤身加固后的渗流稳定性, 采用三维饱和-非饱和渗流有限元法, 根据具体的工况建立了大堤的有限元渗流分析模型, 并运用该模型分析了历史最高水位条件下加固后大堤的渗流性态。计算结果表明: 深层搅拌桩消减水头的作用明显, 土体渗透系数越大, 深层搅拌桩的阻水作用越明显; 堤身与堤基的渗透坡降均小于相应土体的允许渗透坡降, 加固后长江大堤的渗流性态是正常的、安全的。

关键词: 隧道; 长江大堤; 渗流稳定性; 有限元法; 渗流性态

中图分类号: TV871

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0074—04

Seepage Stability Analysis of Yangtze River Levee as Tunnel Traversing

KONG Qing-yu¹, MA Xi-lei¹, WANG Ting-ting²

(1. Tianjin Research Institute of Water Transportation Engineering, Ministry of Communications, Tianjin 300456, China;

2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: After the tunnel-shield-driving machine excavating through the north levee of Yangtze River, some cracks appeared in the levee, and the accumulative settlement of the levee was very large, so the levee was enhanced by deep mixing pile in the project. A three-dimensional saturated and non-saturated seepage finite element method is adopted here to check up the seepage stability of the enhanced Yangtze River Levee. Then, the finite-element seepage analysis model is established based on the actual project condition, and by using this model, the seepage behaviors of the enhanced levee under the condition of historical highest water level are analyzed. The calculation results show that the function of deep mixing piles for reducing water head is evident, and the larger the permeability coefficient of soil, the more evident is the water-tight action of deep mixing piles. The seepage gradients in levee body and foundation are less than the permissive permeability gradients in corresponsive soils, and the seepage behavior of the enhanced Yangtze River Levee is normal and safe.

Keywords: tunnel; Yangtze River Levee; seepage stability; finite element method; seepage behavior

近年来我国修建的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。穿越堤防时, 由于盾构隧道技术存在盾尾空隙及壁后注浆体具有收缩的特性, 会出现不同程度的沉降^[1], 严重时会影响大堤稳定性、渗流形态及防洪功能等^[2-3]。渗流性态好坏是评价堤防渗流是否稳定的重要特征之一。目前关于堤防渗流性态的研究较多^[4-6], 但对于隧道穿越后堤防的渗流性态的研究较少。有限元方法目前在堤

防渗流、边坡稳定、基坑支护及隧道开挖等工程领域的数值模拟中应用较为广泛^[7-9], 但是在盾构隧道穿越后的大堤的渗流稳定性分析研究较少。本文采用三维饱和-非饱和渗流有限元法对某长江隧道盾构机穿越段大堤加固后的渗流性态进行研究, 评价其渗流稳定性。

1 工程概况

长江防洪堤为我国重要防洪工程, 堤防工程等

级为一等1级,其渗流稳定性对大堤的稳定和防洪的安全性至关重要。某长江隧道在施工过程中,采用两台盾构机穿越长江大堤地基。穿越地层为淤泥质粉质黏土夹粉土,大堤为素填土,大堤覆土厚度为11.5 m(坡脚)~16.21 m(堤顶)之间。右线(R线)隧道、左线(L线)隧道先后掘进至大堤背水面坡脚(即K3+735处),通过迎水面坡脚(即K3+783.001),在L线穿越期间,观测发现大堤顶部地面出现两道细小裂纹,同时大堤累计沉降最大达141.9 mm。

根据工程实际情况,在现场调查和分析研究的基础上,该工程采用深层搅拌桩对堤身进行加固。在大堤上游侧建造防渗帷幕,采用SJB-2型深层搅拌桩,为保证桩身可靠链搭接,桩长超过10 m时须采用2排,具体布置如图1所示。本工程采用江北距大堤面10 m以上范围内单排,10 m以下双排的方案。深层搅拌桩的参数指标按河漫滩相淤泥质粘土设计,固化剂浆液采用525(P42.5)号水泥,水泥掺量为15%,相应水泥土28 d无侧限抗压强度值达到0.5 MPa以上。

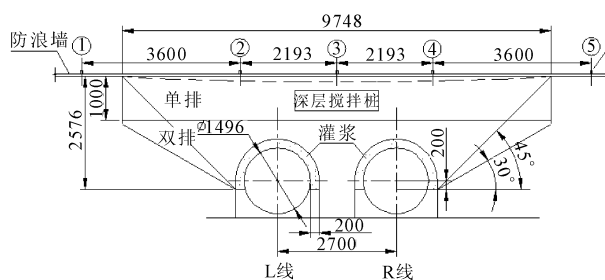


图1 深层搅拌桩的布置位置和范围(单位:cm)

由于在长江北岸大堤城东圩隧道穿越段未设测压管、量水堰等渗流观测设施,无渗流观测资料。大量的算例及一些工程实践表明^[1],在没有实测资料的情况下,按照初始边界条件,首先计算稳定渗流场,第1次初始值的饱和区部分按稳定渗流场计算结果给定,非饱和区部分按经验值给出。然后结合第1次初始值和初始边界条件,按非稳定饱和-非饱和和渗流场计算足够长的时间获取第2次初始值,最终将第2次初始值作为非稳定饱和-非饱和和渗流场的初始渗流场。因此,本文根据地质勘探提供的资料,采用有限元方法计算并分析加固后大堤的渗流性态。

2 计算原理与计算模型

2.1 计算原理

非饱和和渗流是一个非常复杂的问题,从物理特

性考虑是一个多因素互相耦合的过程,其影响因素包括固、液、气三相的体积比、空气压力、土骨架体变、可溶盐含量、温度等。非饱和和渗流基本微分方程是在假定达西定律同样适用于非饱和和渗流情况的前提下通过与饱和和渗流相同的方法推导出来的^[10]。非稳定饱和-非饱和和渗流基本微分方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] - Q = [C(h_c + \beta S_s)] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

其中: h_c 为压力水头; k_{ij}^s 为饱和渗透系数张量; k_{i3} 为饱和渗透系数张量中仅和第3坐标轴有关的渗透系数值; k_r 为相对透水性,为非饱和土的渗透系数与同一种土饱和时的渗透系数的比值,在非饱和区 $0 < k_r < 1$,在饱和区 $k_r = 1$; C 为比容水度,在正压区 $C = 0$; β 为饱和-非饱和选择常数,在非饱和区等于0,在饱和区等于1; S_s 为弹性贮水率,饱和土体的 S_s 为一个常数,在非饱和土体中为0,当忽略土体骨架及水的压缩性时对于饱和区其值也为0; Q 为源汇项。

2.2 计算软件与计算模型

根据上述有限元计算原理、收敛准则以及边界条件的处理方法,用Visual C++开发了三维非稳定饱和-非饱和和渗流有限元计算分析程序CNPM3D。

本工程的计算坐标系作如下规定:取 X 轴垂直于大堤轴线方向,以大堤背水面指向迎水面为正; Y 轴为大堤轴线方向,以隧道 R 线指向 L 线方向为正; Z 轴为垂直方向,向上为正,与高程一致。计算模型的截取范围如下: X 方向,分别以防浪墙靠近迎水面侧为基准,向迎水面和背水面方向各截取55.7 m和64.3 m; Y 方向,取大堤段长120 m; Z 方向,底部截至高程为-30 m,堤顶高程为11.70 m。该模型保留大堤的详细结构,并且根据材料渗透性进行分区,详细模拟地层地质结构。计算模型范围如图2所示。

采用控制断面超单元法生成有限元网格。在综合分析计算区域内的地形、土层等特征的基础上,在上述计算区域内切取控制剖面22个,并据此形成三维超单元网格。加密细分后形成三维有限元网格,计算模型的整体有限元网格如图3所示。有限元模型的边界条件选取如下:大堤迎、背水两侧截取边界为地面高程以下部分($x = 0$ 和 $x = 120$ m)、垂直于隧道轴线的截取边界($y = 0$ 和 $y = 120$ m)以及模型底部($z = -30$ m),取为不透水边界。大堤背水坡面地

下水位以上的部分为出渗边界。由于灌浆帷幕与隧道衬砌外侧固结在一起,阻断了土体可能发生接触冲刷的通道,可以认为土体和隧道衬砌之间不会发生接触渗透破坏。

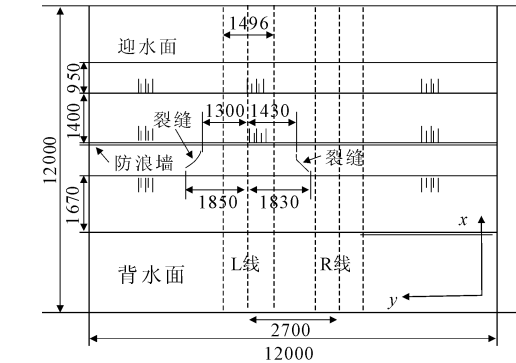


图 2 计算模型范围示意图 (cm)

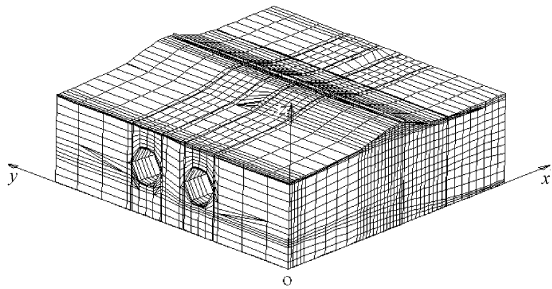


图 3 计算模型的有限元网格

3 计算参数及计算工况

由于盾构机穿越大堤地基,大堤经历了沉降、开裂等过程,大堤内部土体可能已出现微裂纹,甚至较大裂缝,因此,大堤沉降较大范围内的土体的渗透性将会增大,局部甚至显著增大。为了考虑大堤最危险的情况,现选取历史最高水位 10.22 m 工况,变化大堤沉降范围内土体的渗透系数进行计算,对比分析大堤内部裂缝和深层搅拌桩对堤身渗流性态的影响。计算分为三种工况:SL-1——历史最高水位,大堤及地基各土料的渗透系数见表 1;SL-2——历史最高水位,大堤沉降范围内素填土和地基土渗透系数增大 5 倍,其余土料渗透系数同 SL-1;SL-3——历史最高水位,大堤沉降范围内素填土和地基土渗透系数增大 10 倍,其余土料渗透系数同 SL-1。

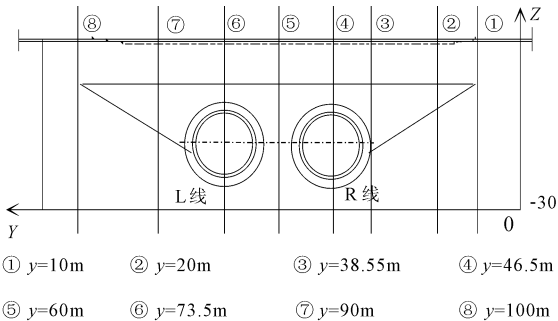
4 计算结果分析

对于每一种工况,分别选取垂直大堤轴线 8 个剖面、平行大堤轴线 2 个剖面分析其地下水水位和位势分布。垂直大堤轴线的剖面和平行大堤轴线方

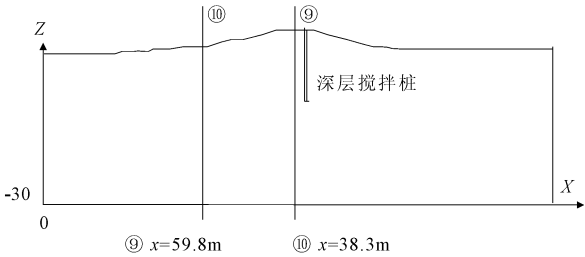
向选取的断面如图 4 所示。

表 1 大堤及地基各土料渗透系数

土料	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	土料	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)
干砌石护坡	5 × 10 ⁻¹	淤泥质粉质粘土	5 × 10 ⁻⁶
灌浆帷幕	1 × 10 ⁻⁶	粉土	3 × 10 ⁻⁴
搅拌桩	5 × 10 ⁻⁷	粉细砂	4 × 10 ⁻³
衬砌	1 × 10 ⁻⁸	淤泥质粉质粘土夹粉土	6 × 10 ⁻⁶
粘土	2 × 10 ⁻⁶	素填土	3 × 10 ⁻⁵



(a)垂直大堤轴线剖面



(b)平行大堤轴线剖面

图 4 计算剖面位置示意图

大堤渗流出逸点高程、堤身最大渗透坡降、搅拌桩体最大渗透坡降、大堤单宽渗流量等成果如表 2 所示。其中,搅拌桩体最大渗透坡降是指在搅拌桩体段渗透水力梯度的最大降低值,堤身单宽渗流量是指计算模型深度范围内沿大堤轴线单位宽度的平均流量。图 5 为三种工况中剖面⑤(y = 60 m)大堤位势分布图,再结合其他相应的地下水水位等值线图及各剖面等势线图,对计算结果分析如下。

(1) 穿越段大堤的渗流位势分布——盾构隧道穿越段的渗流场变化规律较为明确,各种工况下堤身地下水位等值线的分布规律明确。三种工况下深层搅拌桩内的位势等值线密集程度明显递增。在工况 3 情况下,深层搅拌桩内的位势等值线最为密集,其消减水头的作用也最明显。

(2) 渗透坡降和渗透稳定——根据计算结果,在各种工况下,堤身与堤基土层的最大渗透坡降均不超过 0.3,因此,堤身与堤基的渗透坡降均小于相

应土体的允许渗透坡降,可以满足要求。

表 2 大堤渗流分析计算结果

工况	渗流出逸点	堤身最大渗透坡降	搅拌桩体最大渗透坡降	堤身单宽渗流量/[m³/(d·m)]
SL-1	背水坡无出逸	0.132	1.359	3.618
SL-2	背水坡无出逸	0.150	2.440	5.250
SL-3	背水坡无出逸	0.157	3.360	7.142

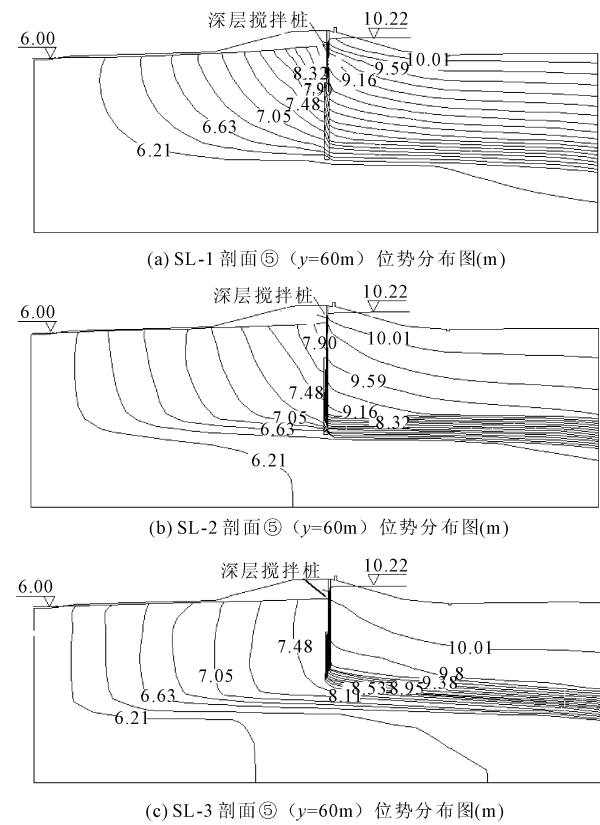


图 5 三种工况剖面⑤ (y=60m)位势分布图

(3) 渗透流量——工况 1 的大堤单宽渗流量为 3.618 m³/(d·m), 工况 2 和工况 3 的大堤单宽渗流量分别为 5.250 m³/(d·m)、7.142 m³/(d·m), 对比工况 1 明显增大, 分别增大了 45%、97%。这说明土体渗透性对渗流量的影响很大。

(4) 深层搅拌桩的作用——从工况 1 的计算结果上来看, 浸润面在通过深层搅拌桩后下降较为明显; 且搅拌桩内的最大渗透坡降很小, 不超过 1.8, 可以满足要求。在工况 2 和工况 3, 深层搅拌桩内的最大渗透坡降明显增大, 分别为 2.440 和 3.360。

这是因为土体的渗透系数变化后搅拌桩的阻水作用亦发生变化。当土体渗透系数增大时, 深层搅拌桩的阻水作用明显增大, 通过深层搅拌桩的水头损失增大。

5 结 论

通过以上分析, 可以得到如下结论:

- (1) 深层搅拌桩消减水头的作用明显, 在各种工况下, 深层搅拌桩内、堤身与堤基的最大渗透坡降均较小, 小于相应土体的允许渗透坡降, 满足要求。
- (2) 当土体的渗透系数变化后, 搅拌桩的阻水作用亦发生变化。当土体渗透系数增大时, 深层搅拌桩的阻水作用明显增大, 通过深层搅拌桩的水头损失增大。
- (3) 应急处理后, 深层搅拌桩对于降低大堤浸润面有明显的作用, 在各种工况下, 隧道穿越段大堤的渗流性态均是正常的, 满足大堤渗流安全要求。

参考文献:

[1] 谢文斌, 吴为义. 大直径泥水盾构下穿钱塘江大堤引起地层沉降的实测分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 142-147.

[2] 吴雅峰, 吴兴龙, 梁明阳. 钱江通道盾构施工对北岸地表沉降的影响分析[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 135-137.

[3] 肖龙鸽, 王超峰, 赵运臣. 大直径泥水盾构施工引起的地表沉降分析和对策[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(5): 50-53.

[4] 卢有清, 彭 虹. 石门拱坝坝基渗流性态分析[J]. 水利学报, 2001, 32(1): 28-34.

[5] 张运芳, 乔利国. 某尾矿库稳定性分析评价[J]. 勘察科学技术, 2011, (6): 29-31.

[6] 李兆炜, 胡再强. 基于渗流理论的尾矿坝坝体稳定性分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1): 56-59.

[7] 侯俊平, 郭 炜. 有限元计算方法在大坝渗流分析中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(5): 63-66.

[8] 田春亮, 赵宏斌, 郭 娟, 等. 某尾矿坝三维有限元渗流分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 121-123.

[9] 马博恒, 王晓明, 李森林, 等. 路堑边坡渗流场的有限差分分析与工程实例[J]. 勘察科学技术, 2010, (2): 42-45, 53.

[10] 韦立德, 黄 威, 陈从新. 饱和-非饱和渗流下膨胀土坡稳定性评估的有限元法[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 21-23, 36.