

# 降雨入渗对地下综合管廊基坑边坡的影响\*

Influence of Rainfall Infiltration on Foundation Pit Slope of Underground Comprehensive Pipe Gallery

丁 天<sup>1</sup>, 裴晓峰<sup>1</sup>, 孙 虎<sup>2</sup>, 项长生<sup>2</sup>

(1. 中国甘肃国际经济技术合作总公司, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为了研究降雨入渗与综合管廊基坑边坡之间的相互影响, 通过设置降雨强度分别为 5 mm/h、10 mm/h、15 mm/h 的三组均匀型降雨工况, 对基坑边坡安全稳定系数进行核算。在降雨量相同的情况下, 选择递减型、均匀型、峰值型和递增型四种不同降雨类别, 对基坑边坡的安全稳定系数变化情况进行探讨。通过计算分析可知, 在条件不发生改变的情况下, 随着降雨强度越强, 基坑边坡安全稳定系数越小, 初始降雨量对其影响最大; 对边坡稳定影响最大的是峰值型降雨, 影响最小的是均匀型降雨, 递增和递减型降雨均对综合管理边坡的稳定造成较大的影响。

**关键词:** 降雨入渗; 基坑边坡; Midas GTS; 地下综合管廊

中图分类号: TU743

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2021) 04-0018-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.04.004

DING Tian<sup>1</sup>, PEI Xiaofeng<sup>1</sup>, SUN Hu<sup>2</sup>, XIANG Changsheng<sup>2</sup>

(1. China Gansu General Corporation for International Economic & Technical Cooperation, Lanzhou 730000, China;

2. College of Civil Engineerin, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to study the interaction between rainfall infiltration and the foundation pit slope of the comprehensive pipe gallery, three groups of uniform rainfall conditions with rainfall intensity of 5 mm/h, 10 mm/h and 15 mm/h were set to calculate the safety and stability coefficient of the foundation pit slope. In the case of the same rainfall, four different types of rainfall, including decreasing type, uniform type, peak type and increasing type, were selected to discuss the variation of safety and stability coefficient of foundation pit slope. Through calculation and analysis, it can be seen that the safety and stability coefficient of the foundation pit slope decreases with the increase of rainfall intensity, and the initial rainfall has the greatest influence on it. Peak type rainfall has the greatest influence on slope stability, while uniform type rainfall has the least influence. Both increasing and decreasing type rainfall have great influence on the stability of integrated management slope.

**Keywords:** rainfall infiltration; foundation pit slope; Midas GTS; underground integrated pipe gallery

## 0 引言

地下综合管廊结构是城市基础设施建设中的一种, 一般是指钢筋混凝土空间结构中, 将两种或两种以上的城市管线合理地安排在该空间中, 具有现代化、集约化的特点<sup>[1-3]</sup>。我国进入地下综合管廊修建工作是 1958 年在天安门广场下修建第一条综合管廊开始的, 以后的综合管廊建设工作由于各种因素导致很

\* 基金项目: 兰州市科技计划项目 (2018-1-44); 安徽省自然科学基金青年项目 (2008085QE247); 安徽省教育厅省级自然科学研究重点项目 (KJ2019A0746)。

作者简介: 丁天 (1973-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事工程管理工作。

收稿日期: 2020-12-16

长一段时间处于停滞状态。我国步入综合管廊现代化施工的一个重要标志是 1994 年上海张扬路地下综合管廊的建成。在该管道的布设上, 涵盖四种不同类别管线, 分别是通信、电力以及给水、燃气<sup>[4-6]</sup>, 而且其是土木行业的全新分支, 代表我国工程建设步入全新发展阶段。结合文献研究可知, 考虑到沉积条件、构成以及应力历史、地质作用等多方面因素作用, 导致边坡土体的参数会有较为明显的变异特质, 能够明显显示出较强变异特性的就是降雨入渗梯度饱和渗透系数。李洪伟等<sup>[6]</sup>提出了 Green-Ampt 模型, 钱七虎、陈洪凯等<sup>[7-8]</sup>在研究饱和渗透系数变异性的模型是根据李洪伟等<sup>[6]</sup>提出的 G-A 模型。借助无限长边坡稳定模型, 从而使我们能够完成极限状态函数构建, 其可以对边坡稳定性状态作出合理的反映; 在边坡安全稳定系数的核算上, 能够揭示降雨入渗三个阶段的情况; 同时给出区域性强风化泥岩降雨入渗公式<sup>[8]</sup>。韩同春等<sup>[9]</sup>在观点分析上, 主要论述了双层土质边坡破坏机制; 陈洪凯等<sup>[10]</sup>针对强风化泥岩入渗试验能够揭示降雨入渗三个阶段的情况, 同时结合研究其给出区域性强风化泥岩降雨入渗公式。但是对于地下管廊放坡明挖阶段, 降雨入渗对地下管廊基坑边坡的影响研究较少。

本文根据降雨入渗与管廊边坡的数值模拟, 对降雨类型及大小的改变对管廊边坡的影响进行数值模拟研究, 数值模拟能够清晰地反映雨季时基坑边坡的稳定性表现, 便于我们采取合理方式开展边坡稳定性保障工作。

## 1 工程概况

本文以甘肃省武威市某地下综合管廊工程项目为例。该工程规划完全处在城市主干道下方, 地下管廊基坑的一侧和城市主干道中机动车道地基相邻, 采取放坡开挖以及喷锚支护等防止基坑坍塌。由于施工空间狭小因素, 放坡系数设为 0.2~0.3, 相对较低, 而且工程建设刚好是雨季, 为确保项目落成后边坡的稳定性, 采用 Midas GTX NX 岩土分析软件对基坑边坡降雨入渗有限元进行数值模拟。该综合管廊标准段构造如图 1 所示, 管廊主体工程各个构件处的抗震强度均设定为二级, 管廊主体工程采取 C30 混凝土强度, 管廊各交叉口以及垫层混凝土使用

的混凝土强度分别是 C35、C20。

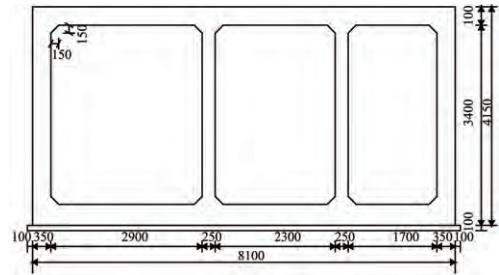


图 1 地下综合管廊结构剖面图

Fig. 1 Structure profile of underground comprehensive pipe gallery

## 2 理论分析

### 2.1 降雨入渗基本过程

实际上, 孔隙体积的压缩是由于降雨入渗的原因导致的。非饱和性岩土体到饱和性岩土体的过程实际上就是非饱和土岩体降雨入渗。在该环节里, 岩土体会有较大孔隙水压力, 基质吸力较差, 催生岩土体里的水与岩土体自身发生流固耦合, 致使非饱和岩土体有较低抗剪强度。基质吸力往往会对非饱和土体抗剪强度带来较大的影响。林鸿州<sup>[11]</sup>的研究为了更好地反映基质吸力以及抗剪强度间关系, 采用压力板和直剪试验来进行模拟, 试验结果显示, 若土壤有较高的含水率, 基质吸力就会下降, 对应的抗剪压力 (对应的抗剪能力) 也更低。对于基坑边坡工程的建设来说, 土体抗剪强度和基坑边坡稳定有较为密切的关联。由于降雨的影响, 导致土体呈现出固—气相到固—液相的变化。在这种情况下, 土体往往会有更高含水量, 为此, 基坑吸力以及抗剪强度都会表现出下滑态势, 基坑边坡会有更低安全系数。

国外学者将非饱和岩土体边坡降雨渗入的研究分非饱和岩土体流固耦合分析以及其抗剪强度两方面内容展开探讨。基于达西定律流动, 渗流可以基于下列公式完成单位面积渗流量核算:

$$\xi = \lambda \omega \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为水力坡降;  $\lambda$  为渗透系数;  $\xi$  为单位面积渗流量。

Midas GTS NX 岩土分析软件中非稳定与稳定渗流方程是:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial W}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2)$$

岩土力学

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial W}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial W}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial W}{\partial z}) + P = 0 \quad (3)$$

式中:  $W$  为总水头;  $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向对应渗透系数。在时间改变的情况下, 稳定流体积含水率不会发生改变; 只有在应力变化下, 才会发生对应变化。基于有效应力  $\sigma - u_a$ 、基质吸力  $u_a - u_w$  完成非饱和土应力情况的表述 ( $u_a$ 、 $u_w$  代表的分别是孔隙气、水压力)。水压力发生变动, 导致体积含水率也会变化, 则:

$$\partial \Phi = m_w \partial u_w \quad (4)$$

式中:  $m_w$  为阻流系数。已知:

$$W = \frac{u_w}{\gamma_w} + z \quad (5)$$

式中:  $\gamma_w$  为重度;  $z$  为标高。可得:

$$\partial \Phi = m_w \gamma_w \partial (W - z) \quad (6)$$

将式 (6) 带入式 (2) 可得:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial W}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial W}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial W}{\partial z}) + P = m_w \gamma_w \frac{\partial (W - z)}{\partial t} \quad (7)$$

标高一定时, 式 (7) 即为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial W}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial W}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial W}{\partial z}) + P = m_w \gamma_w \frac{\partial W}{\partial t} \quad (8)$$

2.2 边坡稳定分析

一直以来, 在边坡稳定计算上, 许多学者做了大量工作, 可总结为强度折减法 (Strength Reduction Method: SRM) 和以极限平衡理论为基础的应力分析法。应力分析法多适用于二维情况下的计算, 先分析边坡应力, 后取边坡安全稳定系数最小值。强度折减法可以自动完成边坡破坏情况模拟, 为此无论是二维或三维环境, 都能够准确计算出所需应力。

非饱和土的抗剪强度描述根据上述内容也采用有效应力  $\sigma - u_a$  和基质吸力  $u_a - u_w$  来表示, 通用的是 Fredlund 给出的抗剪公式:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (9)$$

在上述公式里, 对黏聚力计算, 应该有:

$$c' = c + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (10)$$

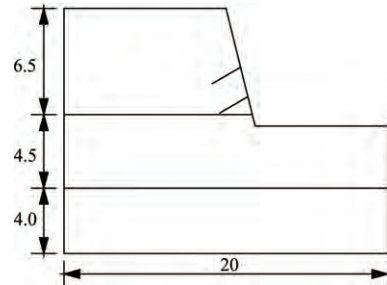
同时折减新黏聚力  $c'$  以及内摩擦角  $\varphi$ ,  $F$  为其对应的折减系数, 可得:

$$\tau = (\sigma - u_a) \tan(\arctan(\tan \varphi / F)) + (c + ((u_a - u_w) \tan \varphi_b)) / F \quad (11)$$

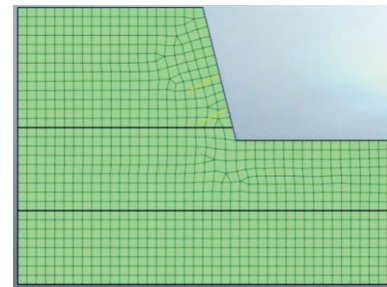
通过不断折减直到无法继续收敛的状态, 此时获取的  $F$  就可被认定是边坡最小安全稳定系数。

3 基坑边坡安装过程模拟分析

该工程在持力层设计上使用的是中砂, 模型为梁单元, 采取 2 m 的 D25 锚杆进行喷锚支护, 其锁力为 50 kN 内, 线属性, 设定混凝土的喷射厚度  $c$  为 12 cm, 弹性模量  $E$  为  $1.5 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>, 密度  $\rho$  为 24 kN/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu$  为 0.2, 则对应锚杆  $\mu$  为 0.3,  $\rho$  为 78.5 kN/m<sup>3</sup>,  $E = 2.0 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup>。具体如图 2 所示。



(a) 基坑边坡示意图



(b) 基坑边坡的有限元模型

图 2 基坑边坡图

Fig. 2 Foundation pit slope

在降雨类别划分上, 可分为递增、递减以及峰值和均匀四种类别, 如图 3 所示。下面结合这四种类别分别进行降雨入渗情况探讨。降雨强度和时间关系是:

$$p = at + b \quad t \leq t_n \quad (12)$$

在上述公式里, 有两个常数, 分别是  $a$ 、 $b$ , 降雨的强度、时间用  $p$ 、 $t$  表示。设  $a$  取值是 0、小于 0、大于 0 分别对应的降雨类别为均匀、递减、递增;  $b$  的取值与  $a$  的取值相关, 决定降雨强度初始值。峰值型是一个分段函数, 前期递增后期递减。基于时间变化条件下降雨强度改变公式, 通过积分,

可以获取如下函数:

$$Q = \int_0^t p = \int_0^t (at + b) \quad (13)$$

其中降雨量是  $Q$ , Midas GTS NX 不可以直接进行降雨分析, 所以需要将降雨转换为渗流, 构建四类别渗流边界函数, 如图 4 所示。

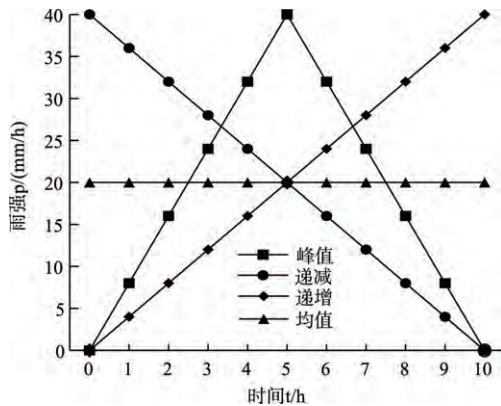


图 3 降雨类型  
Fig. 3 Rainfall type

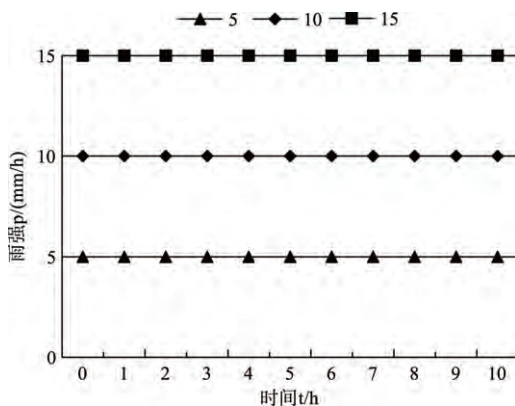


图 4 雨强函数  
Fig. 4 Rain intensity function

## 4 数值模拟分析结果

### 4.1 降雨强度模拟分析

为进一步明确降雨强度可能给基坑边坡带来的影响, 设定不同的降雨强度值为自变量, 均匀降雨基坑位移和锚杆轴力为因变量进行相同降雨时间的分析。共设定 3 组试验, 如图 4 所示, 时间均是 10 h, 三组雨强是 5 mm/h、10 mm/h、15 mm/h。若  $a$  是 0, 三种情况下  $b$  取值则是 5、10、15, 边坡为锚杆支承, 稳定性分别是 1.181、1.173、1.152。

在降雨强度 10 mm/h、15 mm/h 相对于 5 mm/h, 边坡安全性下降比例分别是 0.7%、2.5%; 15 mm/h

相较于 10 mm/h 降雨强度边坡安全性下降值是 1.8%。

由于降雨影响, 导致土体自身的机理发生变化。随降雨强度增大, 土体状态的转变速度也随之加快, 内摩擦角减小, 从而抗剪能力降低。若降水超出土层渗透能力, 此时土层稳定性下降, 安全系数下降。若增幅间量均是 5 mm/h, 那么 10 mm/h 到 15 mm/h 降雨强度增长, 比 5 mm/h 到 10 mm/h 降雨强度增长会有更大的安全系数降幅。这也充分证实, 随着降雨量增加, 会导致综合管廊基坑有更低的边坡安全系数。

研究表明, 在降雨影响下, 会使锚杆平均轴力表现出持续增加效果。这是因为在降雨作用的影响下, 导致支撑锚杆的土层结构发生扰动, 雨水增加土体重量, 导致压实作用影响下增大锚杆对土体抵御力量。相对 5 mm/h 到 10 mm/h, 10 mm/h 到 15 mm/h 降雨强度增长会导致锚杆有更大的轴力幅度。越强的降雨, 会导致锚杆有更突出的支承能力。

### 4.2 降雨类型模拟分析

在降雨类型探讨上, 设定时间都是 10 h, 累积降雨量均是 200 mm。使用渗流边界函数计算, 那么均匀型降雨,  $a = 0, b = 20$ ; 递增型降雨,  $a = 4, b = 0$ ; 递减型降雨,  $a = -4, b = 40$ ; 峰值型降雨, 当  $t \leq 5$  时,  $a = 8, b = 0$ , 当  $5 < t \leq 10$  时,  $a = -8, b = 80$ 。参考图 4 所示。

在进行边坡稳定时程分析上, 采用 Midas GTS NX 完成。单小时安全系数如图 5 所示。

由分析可知, 若有较短持续时间, 那么对边坡稳定有最大影响的是初始降雨量。结合图来说, 有最大安全系数降幅的是递减型。由于其有较大初始降雨量, 所以导致基质吸力、岩土体抗剪强度等都处于飞速下降状态, 最小安全系数是峰值型。在时程分析上, 后期阶段考虑到土层渗透系数不会改变, 其对降水的吸收有限, 所以在后续阶段会出现边坡安全系数回升情况。但是前期, 相较于递增以及均匀型来说, 递减、峰值型降雨会导致前期有较快的安全系数降幅。后续阶段, 由于降雨量降低, 渗流量相对较小, 此时土体的抗剪能力也会逐步回升, 导致其对应的安全性也会增加。对于均匀型降雨而言, 由于降雨量没有太大的变化, 所以在过程中基质吸力以及土体抗剪能力改变不大, 致使其在边坡

## 岩土力学

安全稳定系数上也没有太大的改变。但是由于降水持续进行,会致使其安全系数出现稳定降低表现。递增型前期有较少降水,后续降水逐渐增加,导致其有最低的安全系数降低表现。这是因为后期由于降雨量增加,致使基质吸力迅速变大,抗剪强度降低。而对于峰值型降雨来说,安全系数的变化具有特殊性,开始阶段与递增型相似,结束阶段与递减型相似,但是在峰值阶段由于有较高的降雨强度,所以在该阶段会有较为显著的安全系数降低表现。

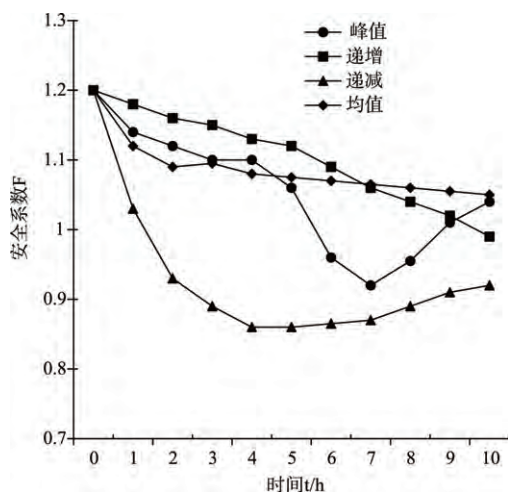


图 5 安全系数时程分析

Fig. 5 Time history analysis of safety factor

## 5 结论

在研究中,基于有限元软件 Midas GTS NX 对模型进行模拟,对降雨入渗与基坑边坡安全性的相互影响进行研究;基于 Midas GTS NX 渗流功能模拟降雨入渗流程,进而建立渗流边界函数,通过不同降雨量和降雨类别对基坑边坡影响的研究,得出如下结论:

由于降雨类型差异,会对基坑边坡稳定带来显著差异。其中初始降雨量对其有最大影响,而持续影响最大为累积降雨量。均匀型降雨安全延性最好,而递增型降雨后期有较低安全性,递减型降雨类别前后阶段表现不一,呈现前阶段低后阶段回升的现象。峰值型降雨同时具备递增、递减型降雨的安全性表现。

## 参 考 文 献

- [1] 钱七虎,陈晓强.国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J].地下空间与工程学报,2007(3):191-194.
- [2] 马宏伟,胡天羽,郭鸿等.内置大质量管道对综合管廊地震响应的影响[J].陕西理工大学学报:自然科学版,2020(1):65-70.
- [3] 夏亚锋.大型综合管廊不同工况下受力变形特征分析[D].保定:河北大学,2019.
- [4] 刘文慧.中国首条现代化地下综合管廊20年的试验史——“有经验,也有教训”[J].给水排水动态,2015(6):40-42.
- [5] 孙飞.城市综合管廊建设与发展趋势[J].中国房地产业,2019(5):44.
- [6] 李洪伟,常畅.综合管廊内输水管道泄漏扩散的数值模拟研究[J].东北电力大学学报,2019,39(1):53-59.
- [7] 钱七虎.建设城市地下综合管廊,转变城市发展方式[J].隧道建设,2017,37(6):647-654.
- [8] 陈洪凯,唐红梅,唐云辉,等.强降雨作用下强风化泥岩降雨入渗特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(10):2755-2760.
- [9] 韩同春,苏钰钦,张宇.双层结构边坡降雨入渗与坡面径流耦合分析[J].工程科学与技术,2020,52(6):145-152.
- [10] 陈洪凯,周晓涵,谭玲.降雨特性对滑坡孔隙水压力影响的试验研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2017,34(1):49-54+2.
- [11] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.