

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.013

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:滕宏泉,高星星,彭森,王志清,朱才辉,王友林,段浩然,赵玮.浅层管道渗漏对黄土填方地基增湿影响研究[J].西安理工大学学报,2026,42(2):281-291.

Teng Hongquan, Gao Xingxing, Peng Sen, Wang Zhiqing, Zhu Caihui, Wang Youlin, Duan Haoran, Zhao Wei. Study on the influence of shallow pipe leakage on the humidification of loess filling foundation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 281-291.

浅层管道渗漏对黄土填方地基增湿影响研究

滕宏泉^{1,2}, 高星星³, 彭森³, 王志清³, 朱才辉³, 王友林¹,
段浩然³, 赵玮⁴

(1. 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心, 陕西 西安 710068; 2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068; 3. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 4. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: 研究浅层管道渗漏对压实黄土填方地基增湿的影响对填方工程的防灾减灾具有重要意义。以某黄土填方工程为背景, 采用 COMSOL Multiphysics 软件建立了浅层管道渗漏有限元模型, 分析了填方体在不同管道渗漏位置 P_i 、渗漏点数量 n 、管道内水压力 P_m 、管道半径 d 、管道埋深 h 和不同压实度 λ 下的增湿影响范围(最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 和相对饱和直径 η)和地表最大沉降 $S_{\max}$ 的变化规律。结果表明: 随着填方体压实度 λ 增大, 最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 和地表最大沉降 $S_{\max}$ 减小; 管道渗漏位置 P_i 为右拱肩(Spr₁)时 $A_{\max}$ 最小, 拱底(Bp)渗漏时地表最大沉降 $S_{\max}$ 最小; 当管道内水压力 P_m 从 0.1 MPa 增加至 0.3 MPa 时, 最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 增加了 1.08 m²; 当压实度 λ 从 0.88 增加至 0.98 时, 地表最大沉降 $S_{\max}$ 减小了 63%; 当管道半径 d 从 0.2 m 增加至 0.75 m 时, 相对饱和直径 η 降低了 37%; 当管道半径 d 超过 0.3 m 后, 渗流稳定时间 t_2 维持在 27 d。在实际工程中, 建议对管道腰部以下采取适当的加固和防渗措施, 管道的内水压力和管径不宜过大, 管道埋深宜超过 1.0 m, 土体压实度宜高于 0.95。

关键词: 填方地基; 管道渗漏; 增湿影响; 数值分析方法

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)02-0281-11

Study on the influence of shallow pipe leakage on the humidification of loess filling foundation

Teng Hongquan^{1,2}, Gao Xingxing³, Peng Sen³, Wang Zhiqing³, Zhu Caihui³, Wang Youlin¹,
Duan Haoran³, Zhao Wei⁴

(1. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Urban Geology and Underground Space, Xi'an 710068, China; 2. Shaanxi Hygrogeology Engineering Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Shaanxi Institute of Water Resource and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710001, China)

Abstract: Studying the influence of shallow pipeline leakage on the wetting of compacted loess fill foundation is of great significance for disaster prevention and mitigation of fill engineering. Tak-

收稿日期: 2024-12-04; 网络首发日期: 2025-06-12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.n.20250612.1330.008>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52279110, 52178355, 52108339); 陕西省公益性地质专项项目(202406); 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心开放性课题(2024KT-04, 2024KT-01)

第一作者: 滕宏泉, 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为地质灾害防治技术及水工环地质。E-mail: 630167271@qq.com

通信作者: 彭森, 男, 博士生, 研究方向为黄土力学与工程。E-mail: psmx118517@163.com

ing a loess fill project as the background, a finite element model for shallow pipeline leakage was established by COMSOL Multiphysics software, the variation laws of the wetting influence range (maximum infiltration circle area $A_{\max}$ and relative saturation diameter η) and the maximum surface settlement $S_{\max}$ were analysed at different pipe leakage positions P_i , number of leakage points n , water pressure P_m in the pipe, pipe radius d , pipe burial depth h and different compaction degrees λ . The results show that as the compaction degree λ of the fill body increases, the maximum wetting circle area $A_{\max}$ and the maximum surface settlement $S_{\max}$ decrease; when the pipe leakage position P_i is at the right arch shoulder (Spr₁), $A_{\max}$ is the smallest, and when the leak occurs at the bottom of the arch (Bp), the maximum surface settlement $S_{\max}$ is the smallest; when the water pressure P_m inside the pipe increases from 0.1 MPa to 0.3 MPa, the maximum wetting circle area $A_{\max}$ increases by 1.08 m²; when the compaction degree λ increases from 0.88 to 0.98, the maximum surface settlement $S_{\max}$ decreases by 63%; when the pipe radius d increases from 0.2 m to 0.75 m, the relative saturation diameter η decreases by 37%; when the pipe radius d exceeds 0.3 m, the seepage stabilization time t_2 remains at 27 d. In the actual engineering, it is suggested that appropriate reinforcement and anti-seepage measures should be taken below the waist of the pipeline, the internal water pressure and pipe diameter of the pipeline should not be too large, the buried depth of the pipeline should be more than 1.0 m, and the soil compaction degree should be higher than 0.95.

Key words: fill the foundation; pipe leakage; moisturizing effect; numerical analysis method

近年来,由于降雨量增多,西北黄土高原地区发生了多起由降雨入渗诱发的黄土工程灾害。在所有灾害事件中,管道渗漏引起的事故约占 55%,表明管道渗漏是此类事故的主要诱因之一。当管道破裂时,管道内流体为重力流,管道周围土体易受冲刷侵蚀,进而被带入管道内部,最终导致沉降或地面塌陷。而市区管道因埋深较浅,所受荷载更为复杂,更易出现磨损、开裂甚至断裂,进而引发管道渗漏。

部分学者通过流体力学方法,研究了管道渗漏引发的地层变形规律,发现在渗漏点埋深的 2~3 倍^[1-2]范围内易出现地表沉降。朱才辉等^[3]研究了压实 Q₃ 马兰黄土的蠕变特性,开展了不同压实度、不同含水量下压实土的单轴排水与不排水蠕变试验,发现 Q₃ 马兰黄土的蠕变特性对水的敏感程度较大。吕高等^[4]也针对上海地区的管线渗漏现象,基于离散元法开展了地下空洞的机理研究,结果发现管片顶部渗漏的沉降大于侧墙沉降,且均会扩散至地表。还有学者基于边坡稳定性分析原理,验证了增湿条件下基质吸力的降低会导致土体黏聚力的下降^[5-6]。此外,有些学者还通过 CFX 软件研究了渗漏孔在不同内水压力下的压降及流速分布规律^[7]。

刘成禹等^[8]通过可视化试验装置,研究了水流侵蚀土体所诱发的地表沉降。文献^[9-11]通过建立管道渗漏的数学模型和现场试验模型,分析了入口压力和渗漏速度对裂缝处压力的影响。王子业等^[12]通过建立数值模型,发现管道破损口周围形成的土拱会导致破损口周围的土压力升高。文献^[13]基于数值模拟方法,验

证了管道底部裂缝引发的地表沉降量和扰动区域比顶部和腰部要小。高程鹏^[14]认为,管道渗漏引发的渗流侵蚀会导致土体的贯入度降低。余俊等^[15]通过建立数值模型,验证了渗漏水流量随管片埋深的增加先减少后增加。文献^[16]认为,局部渗漏对管片水平位移的影响要比竖向位移小,且主要集中在管片拱腰位置。张柏林^[17]利用有限元模型,分析了不同位置渗漏点所引起的管片沉降量,结果表明,同一断面中拱顶引起的沉降量最小,拱腰次之,拱底最大。

综上所述,高填方地基增湿变形的影响因素及其作用机理较为复杂,以往研究虽取得了丰富的研究成果,但并未综合考虑填方地基的压实度和管道渗漏的多个参数对管道周围的浸润圈、饱和范围及地基增湿的影响,高填方压实黄土地基在设计时也存在一定的技术瓶颈。为此,本研究以某黄土填方工程为背景,通过 COMSOL Multiphysics 有限元软件,研究了填方体在不同管道渗漏位置、渗漏点数量、管道内水压力、管道半径、管道埋深和压实度下,最大浸润圈面积和最大沉降的变化规律,以期为后续高填方工程的设计规划提供参考。

1 工程概况

根据地形特征,将工程所处区域划分为黄土陡坡区、黄土缓斜坡区、基岩沟谷及陡坎区、黄土梁峁区、冲洪积及淤积平缓区、冲洪积漫滩及高漫滩区等不同地貌类型。陕北某地区的地下水类型主要包括第四系冲洪积及淤积层孔隙水、冲洪积层孔隙水、黄

土层孔隙水和基岩孔隙裂隙水。由于冲洪积及淤积层孔隙常由砂、砾、黏土等颗粒组成,孔隙度大,因此具有较高的渗透性,受季节变化和降雨量的影响较大,尤其在雨季或洪水期间,孔隙水位可能急剧上升。工程地质剖面图如图1所示。

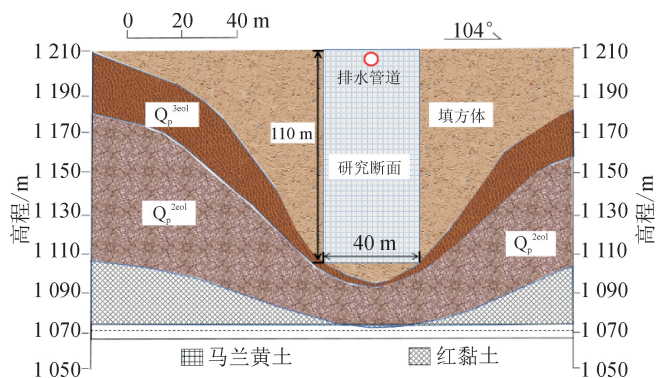


图1 工程地质剖面图
Fig. 1 Engineering geological profile map

2 数值分析方案

2.1 数值模型的构建

根据图1的高填方地勘资料,选取填方体110 m处为研究断面,模型尺寸为110 m×40 m,初始水位线为地表以下110 m,采用COMSOL Multiphysics软件建立二维分析模型。建立“概化”模型时,填土体的高度设为110 m,土体设为填土体,初始水位线距离地表110 m。由于本文主要研究高填方地基浅层排水管道渗漏导致的局部增湿变形问题,故对排水管道渗漏增湿范围内高填方土体的部分网格进行加密,同时适当降低该范围外高填方土体的网格密度。边界条件设置:在模型两侧设置辊支撑进行约束,在填方底部设置固定边界约束,而模型顶面设为自由位移边界;此外,将模型两侧和底部设为不透水边界,顶部设为渗流边界,如图2所示,其中X代表填方水平距离,Y代表填方高度。

数值模拟过程如下。

1) 初始应力、位移及水分场模拟。初始应力场为在自重条件下的初始状态应力场,初始水分场为在初始水位条件下的填方地基的非饱和水分场,将位移清零,可获取初始水分场 w_0 、初始应力场 σ_0 及初始位移场 S_0 。

2) 排水管渗流模拟。首先设置排水管道渗漏的总时长及输出时步,然后启用压力水头边界条件,并将初始状态下稳态分析的最终解,作为后续渗流状态分析的初始值,完成因变量设置。同时,将模型的位移清零,以保证后续变形是排水管道渗漏引起

的地基增湿造成的变形。最后通过COMSOL的渗流模块计算高填方地基在不同压实度 λ (0.88、0.90、0.93、0.95、0.98)及不同管道渗漏工况下的水分场 w_1 、应力场 σ_1 及位移场 S_1 。其中,管道渗漏点的直径为2 cm,渗漏点边界为透水边界。

3) 排水管稳态分析。将2)阶段的最终解作为3)阶段的初始状态,导出管道渗漏工况下土体内稳定后的水分场 w_2 、应力场 σ_2 及位移场 S_2 。其中,渗流稳定指的是管道周围土体的浸润圈面积基本趋于稳定,不再随渗漏时间的变化而变化。

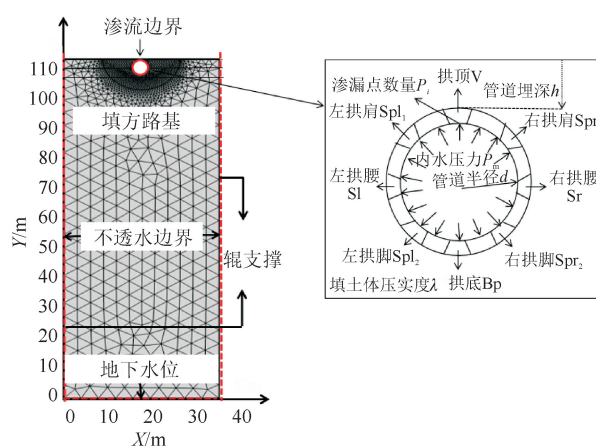


图2 不同管道渗漏条件的有限元模型
Fig. 2 Finite element models of different pipeline leakage conditions

2.2 数值方案

地基浅层排水管道的渗漏主要受排水管道渗漏位置 P_i 、排水管道渗漏点数量 n 、排水管道内水压力 P_m 、排水管道半径 d 、排水管道埋深 h 等多种因素的影响。为分析不同填土体压实度、不同管道渗漏工况下的高填方地基浅层排水管道的水分场及位移场变化,制定如下数值方案(见表1)。

2.3 计算理论

2.3.1 渗流场的计算

通过有效饱和度 S_e 分析非饱和土体的渗流场,将有效饱和度作为黄土高填方地基增湿变形的表征变量:

$$S_e = S_r \quad (1)$$

根据土力学三项指标换算,得到有效饱和度:

$$S_r = \frac{\rho_d \omega d_s}{d_s \rho_w - \rho_d} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)得到式(3):

$$S_e = f(\omega) = \frac{\rho_d \omega d_s}{(1 - S'_r)(d_s - \rho_d)} - \frac{S'_r}{1 - S'_r} \quad (3)$$

式中: S_e 为有效饱和度; S'_r 为残余饱和度; ρ_d 为土的干密度; d_s 为土的相对密度; ω 为土的含水率; ρ_w 为水的密度。

表 1 不同排水管道及地层参数
Tab. 1 Different drainage pipes and formation parameters

数值方案	变量	不变量
渗漏位置 P_i	拱顶(V)、右拱肩(Spr ₁)、右拱腰(Sr)、 右拱脚(Spr ₂)、拱底(Bp)、左拱脚 (Spl ₂)、左拱腰(Sl)、左拱肩(Spl ₁)、全 渗漏(All)	$n = \text{All}, P_m = 0.3 \text{ MPa}, d = 0.3 \text{ m}, h = 0.7 \text{ m}, \lambda = 0.93$
渗漏点数量 n	1、2、3、4、5、6、7、8、All	$P_m = 0.3 \text{ MPa}, d = 0.3 \text{ m}, h = 0.7 \text{ m}, \lambda = 0.93$
内水压力 P_m/MPa	0.1、0.15、0.2、0.25、0.3	$P_i = \text{All}, n = \text{All}, d = 0.3 \text{ m}, h = 0.7 \text{ m}, \lambda = 0.93$
管道半径 d/m	0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.75	$P_i = \text{All}, n = \text{All}, P_m = 0.3 \text{ MPa}, h = 0.7 \text{ m}, \lambda = 0.93$
埋深 h/m	0.3、0.5、0.7、1.0、1.2、1.4	$P_i = \text{All}, n = \text{All}, P_m = 0.3 \text{ MPa}, d = 0.3 \text{ m}, \lambda = 0.93$
压实度 λ	0.88、0.90、0.93、0.95、0.98	$P_i = \text{All}, n = \text{All}, P_m = 0.3 \text{ MPa}, d = 0.75 \text{ m}, h = 0.7 \text{ m}$

2.3.2 Richards 方程

运用 Richards 方程研究非饱和土体的水分迁移规律, Richards 方程的一般形式为:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\theta_w) \nabla \psi) \quad (4)$$

式中: θ_w 为土壤的体积含水率(即水分占总体积的比例); t 为时间; ψ 为基质吸力; $K(\theta_w)$ 为渗透率函数; ∇ 为梯度算子。

但 Richards 方程难以精确描述水分迁移过程,为了解决 Richards 方程表达的准确性问题,将变水力参数引入非饱和土体渗流过程。Richards 扩展方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[d(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[d(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[d(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta_w)}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\partial_x, \partial_y, \partial_z$ 分别为 x, y, z 方向的分量。

2.3.3 Van Genuchten 土水特征模型

采用 Van Genuchten(VG)模型来描述非饱和土体中的水分运移行为,分析水分含量和基质势之间的关系,模型表达式为:

$$\theta_w = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \left| \frac{\psi}{\alpha} \right|^n)^m}, & \psi < 0 \\ \theta_s, & \psi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; α, m, n 为土水特征曲线(SWCC)的拟合参数。

定义相对饱和直径 η 为最大浸润圈面积的半径与管道半径的比值:

$$\eta = \sqrt{\frac{4A_{\max}}{\pi d^2}} \quad (7)$$

式中: η 为相对饱和直径; $A_{\max}$ 为最大浸润圈面积; d 为管道半径。

在不同的管道渗漏位置工况下,高填方地基内的渗流达到稳定后所对应的时间为填土体内管道渗漏的渗流稳定时间 t_2 。

2.4 参数取值

依据朱才辉等^[1]对压实 Q₃ 黄土的物理力学特性研究,不同压实度下的土体位移场模型参数、水分场模型参数及 VG 持水模型参数见表 2。参照不同压实度下 Q₃ 压实黄土的固结压缩试验和抗剪强度试验结果^[1], Q₃ 压实黄土的压缩模量 E_s 、黏聚力 c 及内摩擦角 φ 与体积含水率 θ_w 的拟合公式如表 3 所示。

表 2 Q₃ 压实黄土的数值分析参数^[1]
Tab. 2 Numerical analysis parameters of Q₃ compacted loess^[1]

压实度 λ	0.88	0.90	0.93	0.95	0.98
泊松比 μ	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32
密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.65	1.69	1.75	1.79	1.84
孔隙率 $n / \%$	0.389	0.375	0.352	0.337	0.319
水力传导率 $K_s / (10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	7.29	4.75	2.43	1.62	0.81
渗透系数 $k_s / (10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	7.20	4.75	2.43	1.62	0.81
SWCC 曲线拟合参数 α / kPa	22.2	23.8	28.6	29.4	32.3
SWCC 曲线拟合参数 n	4.6	3.9	3.2	2.6	1.9
SWCC 曲线拟合参数 m	0.45	0.42	0.35	0.34	0.31
残余体积含水率 $\theta_r / \%$	9.5	10.4	11.1	11.8	12.8
饱和体积含水率 $\theta_s / \%$	52.1	49.6	46.7	43.1	39.5

表 3 Q₃ 压实黄土增湿软化函数
Tab. 3 Q₃ compaction loess humidification softening function

压实度 λ	压缩模量 E_s / MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
0.88	$E_s = -1.198 \ln(\theta_w) + 3.6136$	$c = -22.75 \ln(\theta_w) - 4.4837$	$\varphi = -4.822 \ln(\theta_w) + 16.583$
0.90	$E_s = -1.34 \ln(\theta_w) + 4.1754$	$c = -30.19 \ln(\theta_w) - 10.794$	$\varphi = -5.582 \ln(\theta_w) + 16.243$
0.93	$E_s = -1.305 \ln(\theta_w) + 4.3802$	$c = -28.11 \ln(\theta_w) + 6.3275$	$\varphi = -3.885 \ln(\theta_w) + 20.465$
0.95	$E_s = -3.301 \ln(\theta_w) + 3.1018$	$c = -34.81 \ln(\theta_w) + 5.5842$	$\varphi = -3.171 \ln(\theta_w) + 22.352$
0.98	$E_s = -2.128 \ln(\theta_w) + 6.1401$	$c = -32.59 \ln(\theta_w) + 19.287$	$\varphi = -2.508 \ln(\theta_w) + 24.937$

3 结果分析

3.1 管道渗漏位置对压实黄土地基增湿的影响

依据上述数值方案,整理得到排水管道渗漏位置在拱底(Bp)时的模型及计算结果(见图3)。在不同管道渗漏位置 P_i 工况下,分别渗漏 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d,到达最大渗流增湿影响深度后,填土体内部的最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的变化规律见图 4(a),相对饱和直径 η 和地表最大沉降量 $S_{\max}$ 的变化规律见图 4(b),渗流稳定时间 t_2 的变化规律见图 4(c)。

由图 4(a)可知,不同管道渗漏位置工况下,地基内最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 由大到小依次为:全渗漏(All)、右拱腰(Sr)、拱顶(V)、左拱腰(Sl)、拱底(Bp)、右拱脚(Spr₂)、左拱肩(Spl₁)、右拱肩(Spr₁)、左拱脚(Spl₂)。在管道入渗 30 d 后,当管道全部渗漏(All)时, $A_{\max} = 1.27 \text{ m}^2$;当渗漏点在管道的右拱肩处(Spr₁)时, $A_{\max} = 0.08 \text{ m}^2$ 。由图 4(b)可知,当管道全部渗漏(All)时,相对饱和直径 $\eta = 2.12$, $S_{\max}$ 最大为 2.14mm;当渗漏点在管道的右拱脚处(Spr₂)时,相对饱和直径 $\eta = 0.54$;当渗漏点在管道的

拱底(Bp)时,地表最大沉降量 $S_{\max}$ 最小,为 0.04 mm。由图 4(c)可知,当管道渗漏位置为拱底(Bp)时,填土体内管道渗漏的渗流稳定时间 t_2 最长,为 25 d,当管道渗漏位置为右拱脚(Spr₂)时,渗流稳定时间 t_2 最短,为 1.4 d。这是因为重力的存在有利于水分下渗,不利于水分上渗。因此,应对拱腰部以下的黄土地基做好加固和防渗,减少管道因不均匀沉降引起的开裂和渗漏问题。

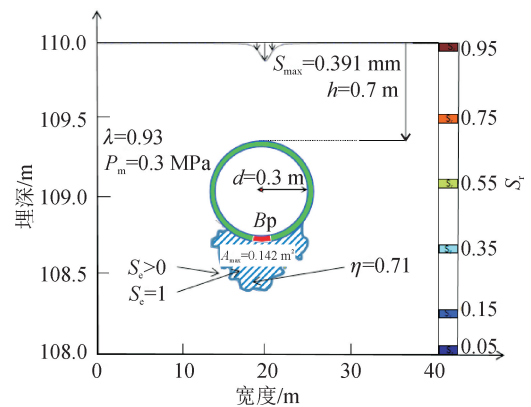


图 3 管道渗漏位置为拱底(Bp)时的模型及计算结果
Fig. 3 Model and calculation results of the pipeline leakage location at the bottom (Bp) of the arch

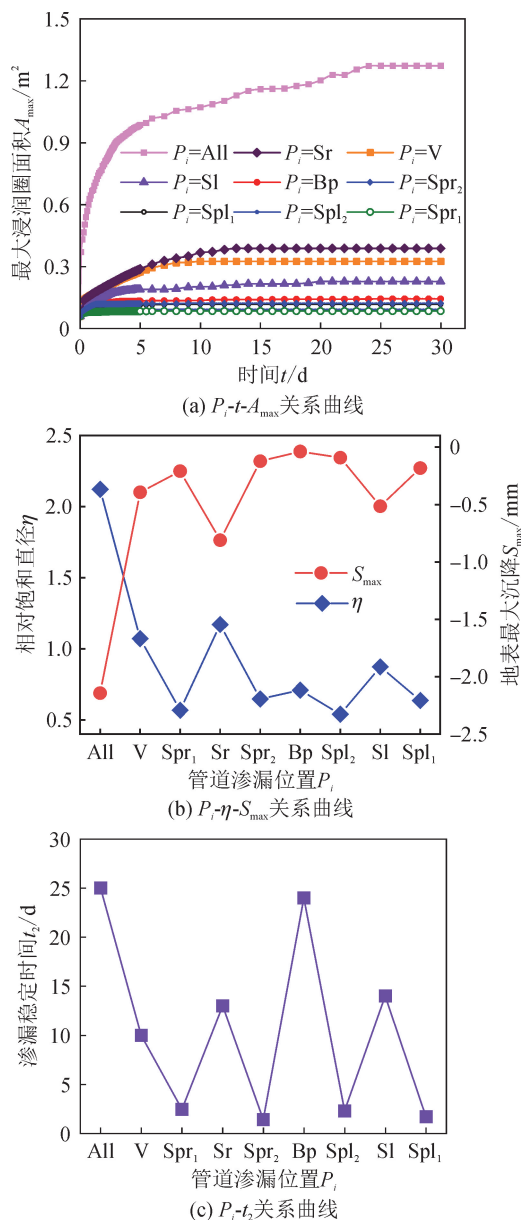


图 4 管道渗漏位置对高填方地基增湿变形的影响

Fig. 4 Influence of pipeline leakage positions on the humidification and deformation of high fill foundation

3.2 管道渗漏点数量对压实黄土地基增湿的影响

依据 2.2 节数值方案,整理得到管道渗漏点数量 $n=1$ ($P_i=V$) 时的模型及计算结果(见图 5)。

在不同管道渗漏点数量 n 工况下,分别渗漏 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d,到达最大渗流增湿入渗深度后,填土体内部的最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的变化规律见图 6(a),相对饱和和直径 η 和地表最大沉降 $S_{\max}$ 的变化规律见图 6(b),入渗稳定时间 t_2 的变化规律见图 6(c)。

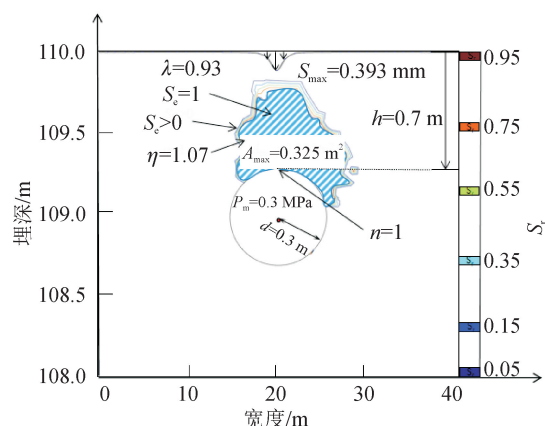


图 5 管道渗漏点数量 $n=1$ 时的模型及计算结果
Fig. 5 Model and calculation results when the number of pipeline leakage points $n=1$

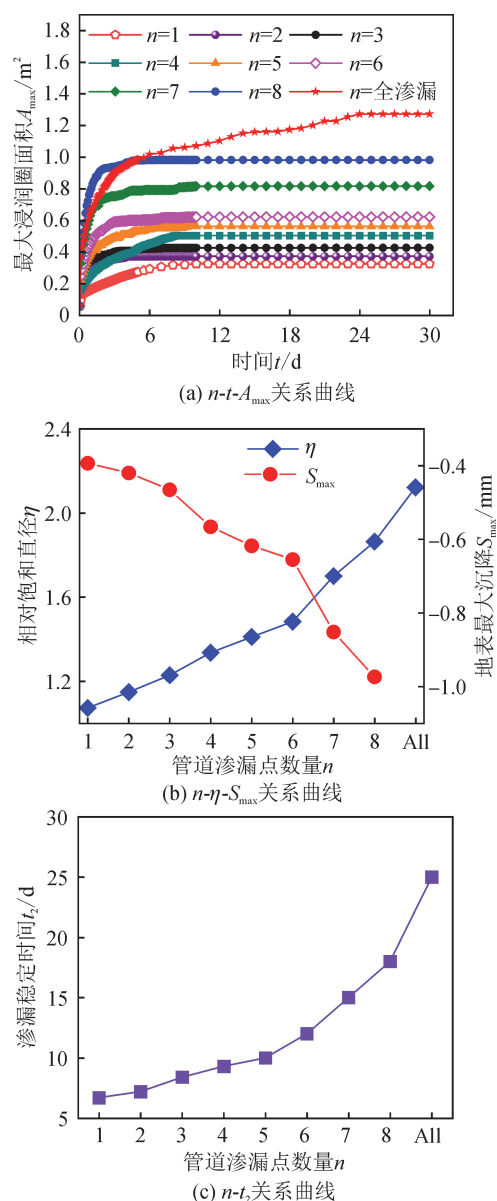


图 6 管道渗漏点数量对地基增湿变形的影响

Fig. 6 Influence of the number of pipeline leakage points on the humidification deformation of foundation

由图 6(a)可知,管道全渗漏($n=All$)时,地基内最大浸润圈面积 A_{max} 的增长速度最快,当渗漏点数量 n 取 1~8 时, A_{max} 的增长速度差别不大; A_{max} 与 n 呈正相关, n 越大, A_{max} 越大。管道入渗 30 d 后,当管道全渗漏($n=All$)时, A_{max} 最大,为 1.27 m^2 ,当管道渗漏点数量为 1($n=1$)时, A_{max} 最小,为 0.33 m^2 。由图 6(b)可知,地基内相对饱和直径 η 与渗漏点数量 n 呈正相关, n 越大, η 越大。管道入渗 30 d 后,当管道全渗漏($n=All$)时, η 最大,为 2.12,当管道渗漏点数量为 1($n=1$)时, η 最小,为 1.07。当管道全渗漏($n=All$)时,地表最大沉降 S_{max} 最大,且远大于其他渗漏点数量下的 S_{max} , S_{max} 与渗漏点数量 n 呈正相关, n 越大, S_{max} 越大。管道入渗 30 d 后,当管道全渗漏($n=All$)时, S_{max} 最大,为 2.14 mm,当管道渗漏点数量为 1($n=1$)时, S_{max} 最小,为 0.46 mm。由图 6(c)可知,管道渗漏稳定时间 t_2 与管道渗漏点数量 n 呈正相关, n 越大, t_2 越大。管道入渗稳定后,当管道全渗漏($n=All$)时, t_2 最长,为 25 d,当管道渗漏点数量为 1($n=1$)时, t_2 最短,为 6.7 d。

总体来说,随着管道渗漏点数量 n 的逐渐增大,最大浸润圈面积 A_{max} 逐渐增大,地表最大沉降 S_{max} 逐渐增大,相对饱和直径 η 也随之增加。由于管道渗漏引起地表增湿变形较大,施工中应尽量避免管道整体失效,强化排水管道的防渗措施。

3.3 管道内水压力对压实黄土地基增湿的影响

依据 2.2 节数值方案,整理得到管道内水压力 $P_m=0.1 \text{ MPa}$ 时的模型及计算结果(见图 7)。在不同管道内水压力 P_m 工况下,分别渗漏 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d,到达最大渗流增湿入渗深度后,填土体内部的最大浸润圈面积 A_{max} 的变化规律见图 8(a),相对饱和直径 η 和地表最大沉降 S_{max} 的变化规律见图 8(b),管道渗漏稳定时间 t_2 的变化规律见图 8(c)。

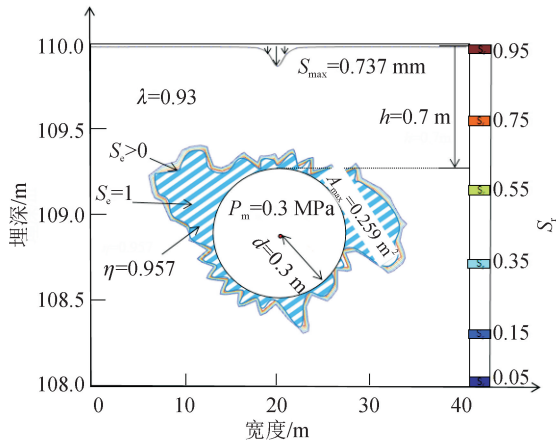


图 7 管道内水压力 $P_m=0.1 \text{ MPa}$ 时的模型及计算结果
Fig. 7 Model and calculation results of internal water pressure $P_m=0.1 \text{ MPa}$ in pipeline

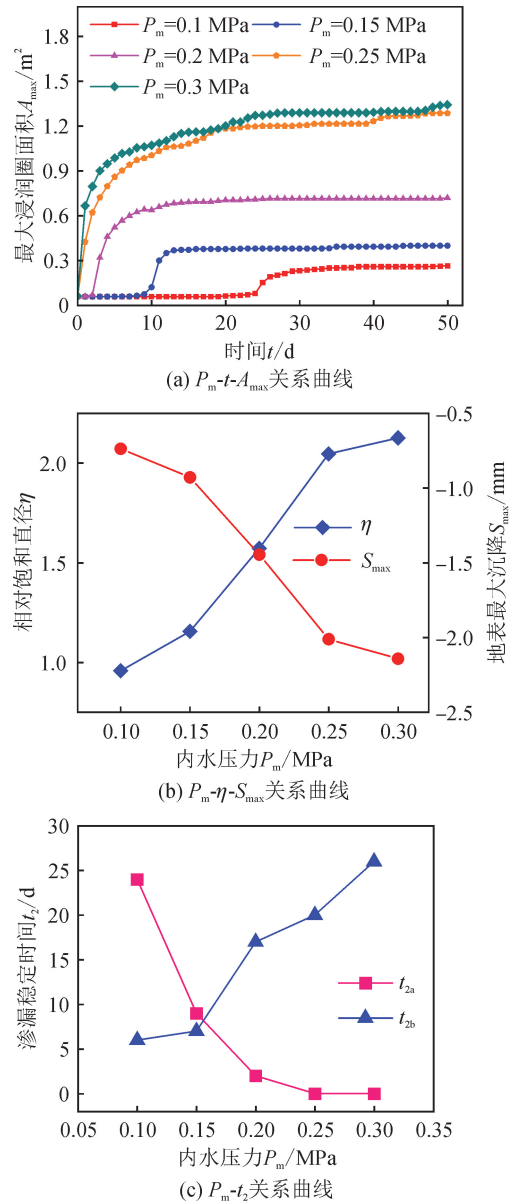


图 8 管道内水压力对地基增湿变形的影响
Fig. 8 Influence of internal water pressure in pipelines on the humidification and deformation of foundation

由图 8(a)可知,当管道内水压力 P_m 为 0.1~0.2 MPa 时,由于管道内水压力小于外水压力,前期管道内水分无法渗入周围土体,地基内最大浸润圈面积 A_{max} 保持不变;经过一段时间的积累,管道内水分逐渐渗入周围土体, A_{max} 开始变化。当管道内水压力 P_m 为 0.25~0.3 MPa 时,管道内水压力已足够大,管道内水分可以直接渗入周围土体。管道入渗 50 d 后,当管道内水压力 $P_m=0.3 \text{ MPa}$ 时,地基内最大浸润圈面积 A_{max} 最大,为 1.34 m^2 ,当管道内水压力 $P_m=0.1 \text{ MPa}$ 时, A_{max} 最小,为 0.26 m^2 。管道内水压力 P_m 与最大浸润圈面积 A_{max} 的增长速度呈正相关, P_m 越大, A_{max} 的增长速度越快。由图 8(b)可知,管道内水压力 P_m 越大,地表最大沉降 S_{max} 越

大,相对饱和直径 η 越大。管道入渗 50d 后,当管道内水压力 $P_m=0.3$ MPa 时, $S_{\max}$ 最大,为 2.14 mm, η 最大,为 2.13。当管道内水压力 $P_m=0.1$ MPa 时, $S_{\max}$ 最小,为 0.93 mm, η 最小,为 0.96。当 P_m 从 0.1 MPa 增至 0.3 MPa 时, η 扩大了 54.9%。由图 8(c)可知,管道渗漏稳定时间 t_2 包括达到渗漏条件的初始时间 t_{2a} 和渗流达到稳定后的时间 t_{2b} ,管道内水压力 P_m 越大,管道渗漏渗流时间 t_{2b} 越长,管道渗漏积累时间 t_{2a} 越短。管道入渗稳定后, $P_m=0.1$ MPa 时,管道渗漏积累时间最长, $t_{2a}=24$ d,管道渗漏渗流时间最短, $t_{2b}=6$ d;当 $P_m=0.3$ MPa 时, $t_{2a}=0$ d, $t_{2b}=26$ d。为防止地表沉降过大,施工过程中应尽量控制管道内水压力,避免因管道破损引发渗漏。

3.4 管道半径对压实黄土地基增湿的影响

依据 2.2 节数值方案,整理得到管道半径 $d=0.2$ m 时的模型及计算结果(见图 9)。在不同管道半径 d 工况下,分别渗漏 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d,到达最大渗流增湿入渗深度后,填土体内部最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的变化规律见图 10(a),相对饱和直径 η 和地表最大沉降 $S_{\max}$ 的变化规律见图 10(b),入渗稳定时间 t_2 的变化规律见图 10(c)。

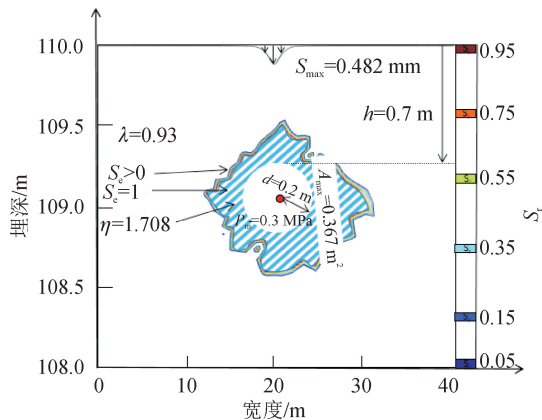
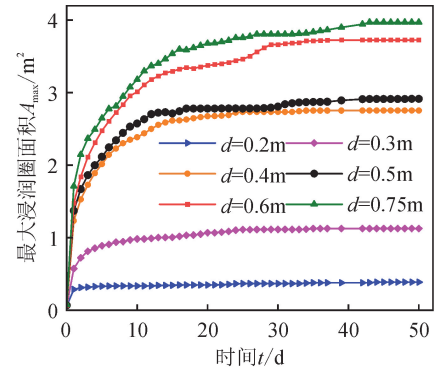


图 9 管道半径 $d=0.2$ m 时的模型及计算结果

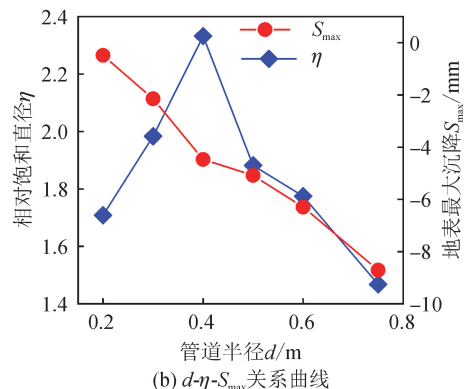
Fig. 9 Model and calculation results of the pipe radius $d=0.2$ m

由图 10(a)可知,管道半径 d 越大,地基内最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的增长速度越快,最终达到的 $A_{\max}$ 越大。管道入渗 50d 后,当管道半径 $d=0.75$ m 时, $A_{\max}$ 最大,为 3.97 m²,当管道半径 $d=0.2$ m 时, $A_{\max}$ 最小,为 0.39 m²。由图 10(b)可知,管道半径 d 越大,地表最大沉降 $S_{\max}$ 越大。当管道半径 $d \leq 0.4$ m 时,相对饱和直径 η 随着管道半径 d 的增大而增大;当管道半径 $d > 0.4$ m 时,相对饱和直径 η

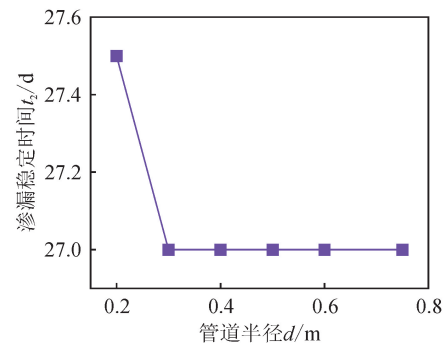
随着管道半径 d 的增大而减小。管道入渗 50 d 后,当管道半径 $d=0.75$ m 时, $S_{\max}$ 最大,为 8.71 mm;当管道半径 $d=0.4$ m 时, η 最大,为 2.33。由图 10(c)可知,管道渗漏稳定时间 t_2 基本保持不变,当管道半径 $d=0.2$ m 时, t_2 最大,为 27.5 d;当管道半径 d 超过 0.3 m 后, t_2 基本维持在 27 d,此时管道半径 d 对管道入渗稳定时间 t_2 的影响不大。管道半径 d 越大,引起的地表沉降越显著,为避免因管道破损引发地基沉降变形,施工中宜选用管径较小的管道。



(a) d - t - $A_{\max}$ 关系曲线



(b) d - η - $S_{\max}$ 关系曲线



(c) d - t_2 关系曲线

图 10 管道半径对地基增湿变形的影响

Fig. 10 Influence of pipe diameter on the humidification and deformation of foundation

3.5 管道埋深对压实黄土地基增湿的影响

依据 2.2 节数值方案,整理得到管道埋深 $h=1.0$ m 时的模型及计算结果(见图 11)。在不同管道埋深 h 工况下,分别渗漏 10 d、20 d、30 d、40 d、

50 d,到达最大渗流增湿入渗深度后,填土体内部最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的变化规律见图 12(a),相对饱和和直径 η 和地表最大沉降 $S_{\max}$ 的变化规律见图 12(b),入渗稳定时间 t_2 的变化规律见图 12(c)。

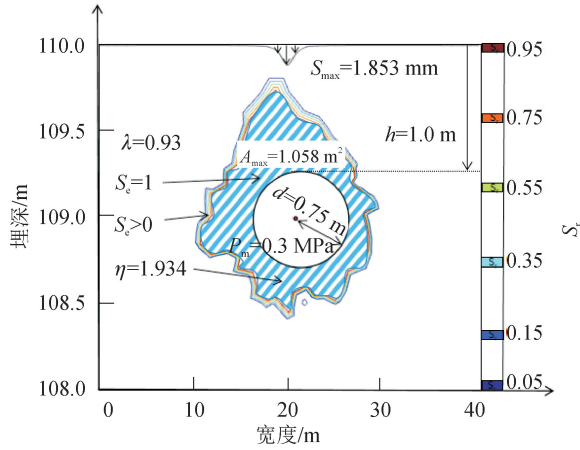


图 11 管道埋深 $h=1.0$ m 时的模型及计算结果
Fig. 11 Model and calculation results of pipeline burial depth $h=1.0$ m

由图 12(a)可知,管道埋深 h 越小,上覆土体压力越小,管道内水分越容易渗入周围土体,地基内最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的增长速度越快。管道入渗 50 d 后,当管道埋深 $h=0.7$ m 时, $A_{\max}$ 最大,为 1.58 m^2 ,当管道埋深 $h=0.3$ m 时, $A_{\max}$ 最小,为 0.84 m^2 。由图 12(b)可知,当管道埋深 $h<0.7$ m 时,地表最大沉降 $S_{\max}$ 随着管道埋深 h 的增大而增大;当 $0.7 \text{ m} \leq h<1.0$ m 时,地表最大沉降 $S_{\max}$ 随着管道埋深 h 的增大而减小;当管道埋深 $h \geq 1.0$ m 时,地表最大沉降 $S_{\max}$ 基本保持不变。随着管道埋深 h 的增加,相对饱和和直径 η 先增大后减小;当 $h=0.7$ m 时,相对饱和和直径 η 达到最大,为 2.34;当 $h=1.4$ m 时, η 最小,为 1.65。当 h 从 0.7 m 增至 1.4 m 时, η 降低了 29%,当 h 从 0.3 m 增至 0.7 m 时, $S_{\max}$ 增加了 73%。这是由于管道埋深较浅时,管道渗漏的水分可能会渗出地面甚至在地表产生积水,使得实际最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 变小,相对饱和和直径 η 增大;随着管道埋深 h 的增大,管道上覆土压力不断增大,管道中的水分难以渗入周围土体,使得最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 减小,相对饱和和直径 η 减小。由图 12(c)可知,管道埋深 h 越大,管道入渗稳定时间 t_2 越长,但 t_2 的增长速度逐渐减小;当 $d=0.3$ m 时, $t_2=5$ d;当 $d=1.4$ m 时, $t_2=18$ d。由于管道埋深为 0.7 m 时地表沉降最大,

为避免管道破损引发地基沉降,管道埋深不宜低于 1.0 m。

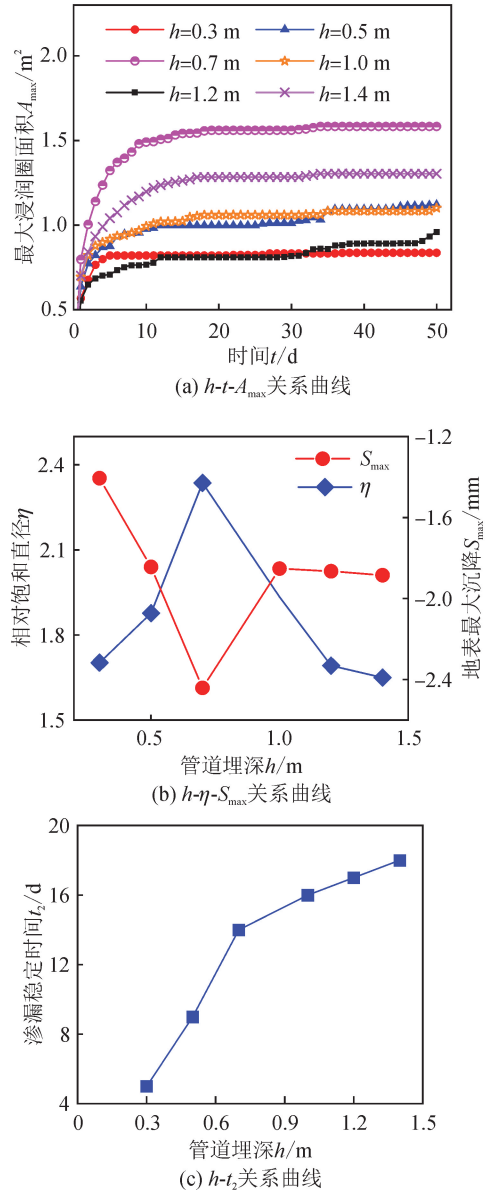


图 12 管道埋深对地基增湿变形的影响
Fig. 12 Influence of pipe buried depth on the humidification and deformation of foundation

3.6 填土体压实度对压实黄土地基增湿的影响

依据 2.2 节数值方案,整理得到填土体压实度 $\lambda=0.88$ 时的模型及计算结果(见图 13)。在不同填土体压实度 λ 工况下,分别渗漏 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d,到达最大渗流增湿入渗深度后,填土体内部最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的变化规律见图 14(a),相对饱和和直径 η 和地表最大沉降 $S_{\max}$ 的变化规律见图 14(b),入渗稳定时间 t_2 的变化规律见图 14(c)。

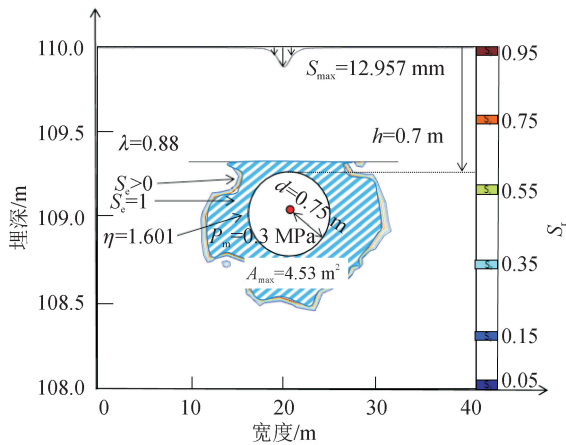
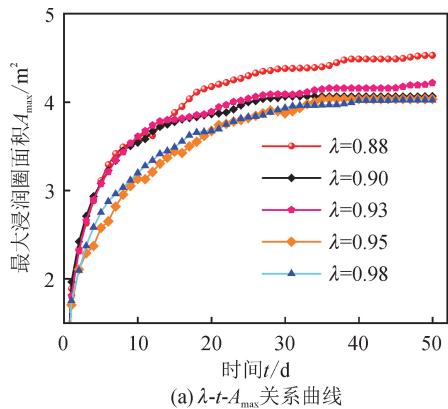
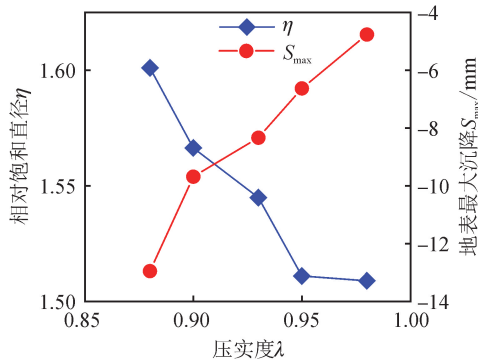


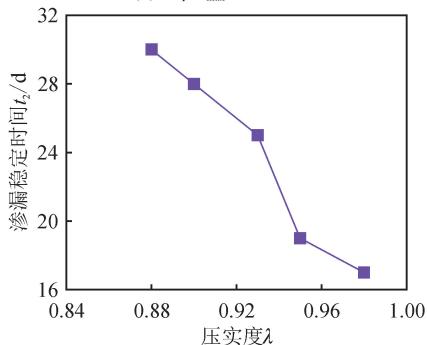
图 13 填土体压实度 $\lambda=0.88$ 时的模型及计算结果
Fig. 13 Model and calculation results of the soil compaction degree $\lambda=0.88$



(a) λ - t - $A_{\max}$ 关系曲线



(b) λ - η - $S_{\max}$ 关系曲线



(c) λ - t_s 关系曲线

图 14 填土体压实度对地基增湿变形的影响
Fig. 14 Influence of fill soil compaction degree on humidification deformation of foundation

由图 14(a)可知,填土体压实度 λ 越大,地基内最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 的增长速度越慢,最终达到的最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 越小。管道入渗 50 d 后,当填土体压实度 $\lambda=0.88$ 时, $A_{\max}$ 最大,为 4.53 m^2 ,当填土体压实度 $\lambda=0.98$ 时, $A_{\max}$ 最小,为 4.02 m^2 ;当 λ 从 0.88 增至 0.98 时, $A_{\max}$ 减少了 0.51 m^2 。

由图 14(b)可知,填土体压实度 λ 越大,地表最大沉降 $S_{\max}$ 和相对饱和直径 η 越小。管道入渗 50 d 后,当填土体压实度 $\lambda=0.88$ 时, $S_{\max}$ 最大,为 12.96 mm , η 最大,为 1.60 ;当填土体压实度 $\lambda=0.98$ 时, $S_{\max}$ 最小,为 4.76 mm , η 最小,为 1.51 。填土体压实度 λ 从 0.88 增至 0.98 时,地表最大沉降 $S_{\max}$ 减小了 63%,相对饱和直径 η 减小了 0.09。

由图 14(c)可知,填土体压实度 λ 越大,管道入渗稳定时间 t_s 越短;当填土体压实度 $\lambda=0.88$ 时,管道入渗稳定时间最长, $t_s=30 \text{ d}$;当填土体压实度 $\lambda=0.98$ 时,管道入渗稳定时间最短, $t_s=17 \text{ d}$ 。由于填土体压实度越大,地表沉降变形越小,为避免因管道破损引发地表沉降,施工中应适当增大填土体的压实度,压实度宜高于 0.95。

4 结 论

本文通过 COMSOL Multiphysics 有限元软件,研究了非饱和黄土填方地基在不同填土体压实度、不同管道渗漏工况下水分场及位移场的分布规律。

1) 管道在拱腰处渗漏所引发的最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 及地表最大沉降 $S_{\max}$ 对变形的影响最大,拱脚处的变形影响最小。当管道从单点渗漏($n=1$)发展为全断面渗漏($n=\text{All}$)时,管道周围黄土地基的最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 、地表最大沉降 $S_{\max}$ 及相对饱和直径 η 均随之增大,其中 $S_{\max}$ 增加了 78%。建议对管道拱腰部及以下地基采取加固与防渗措施,减小地基不均匀沉降及管道渗漏引发的地表沉降。

2) 管道内水压力 P_m 和管道半径 d 越大,地基内最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 、地表最大沉降 $S_{\max}$ 和相对饱和直径 η 越大,设计中宜根据上部建筑的给排水设计要求,确定合适的管径和内水压力。

3) 随着管道埋深 h 的增加,最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 和相对饱和直径 η 先增加后减少,而地表最大沉降 $S_{\max}$ 先减少后增加。随着压实度 λ 的增大,管道周围黄土地基的最大浸润圈面积 $A_{\max}$ 、地表最大沉降 $S_{\max}$ 及相对饱和直径 η 均随之减小。因此,在设计施工过程中,宜适当增大填土体的压实度和管道埋深,压实度不宜低于 0.95,埋深不宜低于 1.0 m。

参考文献:

- [1] 朱才辉,李宁. 降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影响研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(5):845-854.
Zhu Caihui, Li Ning. Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 845-854.
- [2] 周远强,吴宏,朱才辉,等. 黄土高填方工后沉降影响因素敏感性分析[J]. 西安理工大学学报,2018,34(1):92-98.
Zhou Yuanqiang, Wu Hong, Zhu Caihui, et al. Sensitivity analysis of influence factors of post-construction settlement on loess high fill embankment[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(1): 92-98.
- [3] 朱才辉,李宁,刘俊平. 压实 Q_3 马兰黄土蠕变规律研究[J]. 西安理工大学学报,2011,27(4):392-399.
Zhu Caihui, Li Ning, Liu Junping. Research on the creep behavior of compacted Q_3 Ma-Lan loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 392-399.
- [4] 吕高,杨杰,李宁,等. 黄土地基不良地质界面瞬态地质雷达波形 FDTD 正演分析[J]. 西安理工大学学报,2018, 34(2): 185-191, 204.
Lü Gao, Yang Jie, Li Ning, et al. FDTD forward of transient GPR waveform on adverse geological interface of loess foundation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(2): 185-191, 204.
- [5] 陈存礼,胡再强,骆亚生. 兰州黄土掺合无机结合料的力学特性试验研究[J]. 西安理工大学学报,2001,17(3):288-291.
Chen Cunli, Hu Zaiqiang, Luo Yasheng. Research on the mechanical characteristics of loess mixed into inorganic combinative material in Lanzhou[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(3): 288-291.
- [6] Zhao Z, Wang T, Jin X, et al. A new model of temperature-dependent permeability coefficient and simulating of pipe leakage produced immersion of loess foundation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(1): 23.
- [7] 邓国华,邵生俊,梁永恒. 结构性黄土的压力敏感性研究[J]. 西安理工大学学报,2008,24(2):139-143.
Deng Guohua, Shao Shengjun, Liang Yongheng. Research on pressure sensitivity of structured soils[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(2): 139-143.
- [8] 刘成禹,陈博文,罗洪林,等. 满流条件下管道破损诱发渗流侵蚀的试验研究[J]. 岩土力学,2020,40(1):1-10.
Liu Chengyu, Chen Bowen, Luo Honglin, et al. Experimental study of seepage erosion induced by pipeline damage under full pipe flow condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 40(1): 1-10.
- [9] 吴昊,李录平,刘洋,等. 液体压力管道缝隙泄漏流场数值模拟[J]. 汽轮机技术,2014,56(6):429-431, 435.
Wu Hao, Li Luping, Liu Yang, et al. Numerical simulation of flow field in pressure pipe crack leakage[J]. Turbine Technology, 2014, 56(6): 429-431, 435.
- [10] Dai Z, Peng L, Qin S. Experimental and numerical investigation on the mechanism of ground collapse induced by underground drainage pipe leakage[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(1): 32.
- [11] Peche A, Graf T, Fuchs L, et al. A coupled approach for the three-dimensional simulation of pipe leakage in variably saturated soil [J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 569-585.
- [12] 王子业,谭勇,龙莹莹. 不同渗漏位置下管道渗蚀物理模型试验及微观机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(6):1209-1220.
Wang Ziye, Tan Yong, Long Yingying. Seepage erosion test and its mesoscopic mechanism at different pipeline-leaking locations[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2024, 58(6): 1209-1220.
- [13] 王越林,陆烨. 城市地区管道渗漏引发地面塌陷成灾机理的 CFD-DEM 联合计算模拟分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2021,43(2):60-67.
Wang Yuelin, Lu Ye. CFD-DEM simulation of disaster mechanism of pavement collapse caused by pipeline leakage in urban areas[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 60-67.
- [14] 高程鹏. 管道破损引发渗流侵蚀过程的模型试验[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(6):1646-1656.
Gao Chengpeng. Model tests on seepage erosion progress caused by damage of municipal pipeline[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1646-1656.
- [15] 余俊,李东凯. 隧道拱顶渗漏稳态渗流场的解析研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(4):838-846.
Yu Jun, Li Dongkai. Analytical study of steady state seepage field of tunnel vault leakage[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2024, 58(4): 838-846.
- [16] 杨东辉,段宇昕,王俊杰,等. 考虑局部渗漏影响的黄土输水隧洞力学行为研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):8-15.
Yang Donghui, Duan Yuxin, Wang Junjie, et al. Influence of water conveyance tunnel leakage in loess area based on numerical analysis[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(3): 8-15.
- [17] 张柏林. 软土盾构隧道局部渗漏引起的沉降计算与分析[J]. 城市轨道交通研究,2015,18(8):86-88.
Zhang Bolin. Calculation and analysis for the leakage-induced settlement of shield tunnel in soft soil [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(8): 86-88.

(责任编辑 周 蓓)