

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.08.009

# 降雨条件下城墙土水特性与稳定性研究

吴 恺<sup>1</sup>, 沈 峰<sup>1</sup>, 李秉宜<sup>1</sup>, 章 青<sup>2</sup>, 陈卫荣<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 河海大学 工程力学系, 南京 211100; 3. 江苏新亚  
勘测设计有限公司, 江苏 苏州 215137)

**摘要:** 降雨入渗会影响城墙稳定性, 最终导致城墙失稳坍塌。文中以城墙为研究对象, 通过试验得到了土体的物理力学特性和非饱和特性, 以试验数据为基础得到了以含水率为变量的抗剪强度公式, 基于 Bishop 法得到安全系数的表达式。对不同工况下城墙边坡进行渗流场有限元分析与稳定性评价, 并对梅雨季城墙稳定性变化及孔隙水压力分布进行分析。结果表明, 随着降雨的不断进行, 孔隙水压力逐渐增大, 表层土体开始饱和, 前期入渗深度不断增加, 后期地下水位上升。梅雨季城墙稳定性持续下降, 受降雨总量和降雨时长影响较大。研究成果可为区域典型气候条件下的该地区城墙修缮等工程的设计与施工提供理论参考。

**关键词:** 城墙; 稳定性; 土水特征曲线; 降雨入渗; 安全系数

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)08-088-13

## Soil-water characteristics and stability of city walls under rainfall conditions

WU Kai<sup>1</sup>, SHEN Feng<sup>1</sup>, LI Bingyi<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>2</sup>, CHEN Weirong<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, P. R. China; 2. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 211100, P. R. China; 3. Jiangsu Xinya Survey & Design Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215137, P. R. China)

**Abstract:** Rainfall infiltration can affect the stability of the city wall, eventually leading to instability and collapse. This study focuses on the city wall as the object of study and investigate the physical and mechanical properties as well as unsaturated properties of the soil through experiments. Based on the experimental data, a shear strength formula with variable water content is derived, and the safety factor expression is obtained using the Bishop method. Finite element analysis and stability evaluation are conducted on the seepage field of the city wall slope under different working conditions, and the stability change of the city wall and the distribution of pore water

收稿日期: 2022-12-05

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(12172121, 51709194); 江苏省产学研合作项目(BY2022570); 河海大学岩土力学与堤坝工程国家教育部实验室开放基金项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏高校“青蓝工程”资助项目; 苏州市建设系统科研项目。

Supported by National Natural Science Foundation of China (12172121, 51709194), Project on the Integration of Industry, Education, and Research of Jiangsu Province (BY2022570), Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, Qinglan Project of Jiangsu Province, and Suzhou Construction Research Project.

**作者简介:** 吴恺(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事边坡工程研究, (E-mail) 1149045917@qq.com。

**通信作者:** 沈峰, 男, 副教授, 博士, (E-mail) shenfeng1023@163.com。

pressure during the plum rain season are analyzed. The results show that with the continuous progress of rainfall, the pore water pressure gradually increases, the surface soil begins to saturate, the depth of infiltration continues to increase in the early stage, while the groundwater level rises in the later stage. The stability of the city wall continues to deteriorate during the rainy season, greatly affected by the total amount and duration of rainfall. These findings serve as a theoretical reference for the design and construction of the city wall repair and other projects in the region under typical regional climatic conditions.

**Keywords:** city wall; stability; soil-water characteristic curve; rainfall infiltration; safety factor

城墙是古代军事防御的中心和城市权威的象征,具有较高的社会价值、艺术价值及科学价值<sup>[1]</sup>。降雨入渗是影响城墙稳定性,导致城墙失稳坍塌的直接原因<sup>[2]</sup>,如2014年襄阳城墙、2015年盘门城墙、2016年南京定淮门小桃园明城墙、2021年平遥古城墙在降雨后发生失稳坍塌事故。因此,研究降雨入渗下的城墙稳定性,分析不同降雨作用下城墙稳定性的变化,对城墙的防护具有十分重要的指导意义。

湛文武等<sup>[3]</sup>基于室内模拟实验分析长城遗址破坏原因;岳建伟等<sup>[4]</sup>结合实验与数值模拟定性分析了定远营城墙稳定性;孔德政等<sup>[5]</sup>研究了不同类型长城在地震作用下的动力响应;周长东等<sup>[6]</sup>建立8种不同工况下的故宫城墙模型;王思远等<sup>[7]</sup>运用电镜扫描等手段对卫辉共城遗址进行微观分析,并对4种工况进行数值模拟。Chen等<sup>[8]</sup>研究了复合材料对永昌长城遗址加固效果;Bui等<sup>[9]</sup>利用离散元建模研究了夯土遗址稳定性;Zhu等<sup>[10]</sup>以黄土窑洞为研究对象,进行了定量和定性的分析。El Nabouch等<sup>[11]</sup>首次提出了层间位移对夯土遗址的影响;Wang等<sup>[12]</sup>通过制作风化牺牲层达到保护土遗址的目的。而在渗流对边坡稳定性影响方面,彭守建等<sup>[13]</sup>基于室内试验,对降雨时间、降雨强度、冲蚀堆积体体积进行三维拟合;陈朝晖等<sup>[14]</sup>研究了饱和和渗透系数空间变异性对边坡稳定性的影响;卢玉林等<sup>[15]</sup>基于极限平衡理论,推导了渗流和地震存在时2种不同方法安全系数表达式。

从地域范围来看,对故宫城墙、平遥古城墙以及西安城墙等北方地区的城墙研究较多,但对长江中下游地区,如苏州地区城墙的土体力学特性与稳定性研究还较少。另一方面,对于城墙的稳定性较少考虑土体非饱和特性的影响。文中以苏州盘门城墙为对象,通过常规试验与滤纸法试验得到该土体的物理力学特性与非饱和特性,揭示了含水率与抗剪强度的关系,选取典型剖面建立数值模型,研究不同降雨工况下的城墙稳定性变化,并对2019年-2021年梅雨季城墙稳定性变化及孔隙水压力分布进行分析,完成了盘门城墙稳定性评价。研究成果为区域典型气候条件下的该地区城墙修缮等工程的设计与施工提供理论参考。

## 1 计算理论

文中结合非饱和渗流理论、非饱和抗剪强度理论、极限平衡法理论等,对降雨条件下边坡稳定性进行分析。

### 1.1 非饱和渗流计算

1931年Richards在非饱和土渗流问题中,以饱和土的达西定律为基础,提出了适用于非饱和土的达西定律<sup>[16]</sup>,其表达式为

$$q = v = -k_w \nabla h, \quad (1)$$

式中: $q$ 为单位时间单位面积土体上通过的水量; $v$ 为渗流速度; $k_w$ 为非饱和土体的渗透系数; $\nabla h$ 为水力梯度。

降雨入渗过程的实质是坡内土体的含水率上升,土体由饱和状态发展到非饱和状态。边坡降雨入渗可以视为二维非饱和状态,其渗流控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (2)$$

式中: $\theta$ 是体积含水率; $k_x$ 、 $k_y$ 分别为 $x$ 方向和 $y$ 方向的渗透系数; $H$ 是总水头; $t$ 为时间。

由流体的连续方程、质量守恒方程、达西定律可以推导出饱和-非饱和渗流微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

式中: $m_w$ 为土水特征曲线的斜率; $\gamma_w$ 为水的重度。

### 1.2 非饱和和强度理论

Fredlund等<sup>[17]</sup>建立了非饱和土的抗剪强度模型,提出双变量抗剪强度公式

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b, \quad (4)$$

式中: $c'$ 为有效黏聚力; $u_a$ 为孔隙气压力; $u_w$ 为孔隙水压力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; $\sigma$ 为正应力; $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力; $\phi'$ 为有效摩擦角; $\phi^b$ 为基质吸力对抗剪强度贡献对应的摩擦角。

把非饱和土的有限黏聚力 $c'$ 分为初始黏聚力 $\bar{c}$ 和吸应力 $\Delta c$ 。初始黏聚力 $\bar{c}$ 为土体饱和时的黏聚力,当土体完全饱和时,通过直剪试验得到。吸应力则是基质吸力变化时引起的土体毛细黏聚力增量,通过有效黏聚力与初始黏聚力计算得到。

引入转化率 $\beta$ ,表示基质吸力转化为吸应力的转化率,将非饱和土抗剪强度公式转换为

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan \phi' + \bar{c} + (u_a - u_w) \beta, \quad (5)$$

式中, $\beta$ 为转化率,在0~1之间变化,与土体含水率及颗粒级配密切相关。

### 1.3 边坡稳定性计算

文中基于简化的Bishop法,计算得到边坡安全系数,从而分析边坡稳定性。该方法考虑了土条间法向力,不考虑土条间剪切力,建立了基于垂直方向静力平衡的条块底部法向力方程<sup>[18]</sup>:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha_i}} [W_i \tan \phi_i + c_i b_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i}, \quad (6)$$

式中: $W_i$ 是土条的重量; $\phi_i$ 为滑动面的内摩擦角; $\alpha_i$ 是土条底面与水平方向的夹角; $b_i$ 是土条宽度。

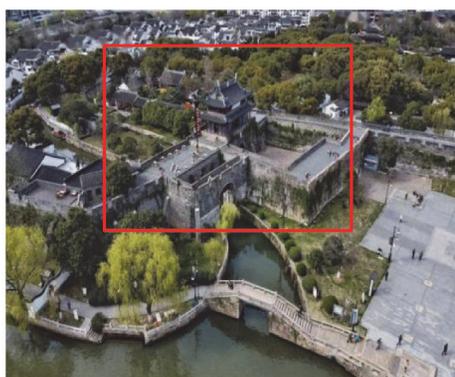
公式(6)没有考虑孔隙水压力的影响,通过土水特征曲线将土体抗剪强度与含水率联系起来,将其运用到简化Bishop法中,得到考虑孔隙水压力时边坡安全系数为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha_i}} (W_i \tan \phi' + u_{si} b \tan \phi^b + c' b_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i}, \quad (7)$$

式中: $u_{si}$ 是土条处的孔隙水压力; $c'$ 和 $\phi'$ 为有效黏聚力和有效内摩擦角。

## 2 计算模型与参数

盘门城墙位于苏州老城区西南角,是苏州古城墙的代表性样本。由于自然环境因素作用及人类活动的影响,存在局部沉降、局部变形与鼓胀、墙体裂缝等问题。2015年东段城墙约80 m长的北墙发生坍塌。盘门城墙现状如图1所示。



(a) 盘门城墙鸟瞰图



(b) 盘门城墙主视图

图1 盘门城墙现状

Fig. 1 Current situation of Panmen city wall

### 2.1 计算模型

依据工程地质剖面图,选取典型剖面,建立数值模型,计算时认为城墙砖体属于砌体结构,从整体上看,其结构类似于高陡边坡,建立如图 2 所示边坡几何尺寸模型。进行数值分析时,将网格尺寸取为 0.1 m,计算单元大部分为四边形单元,局部有少量三角形单元,总计 48 627 结点,48 191 单元,时间步长取为 8 h。根据实际情况地下水位线在地表以下 1 m 处。

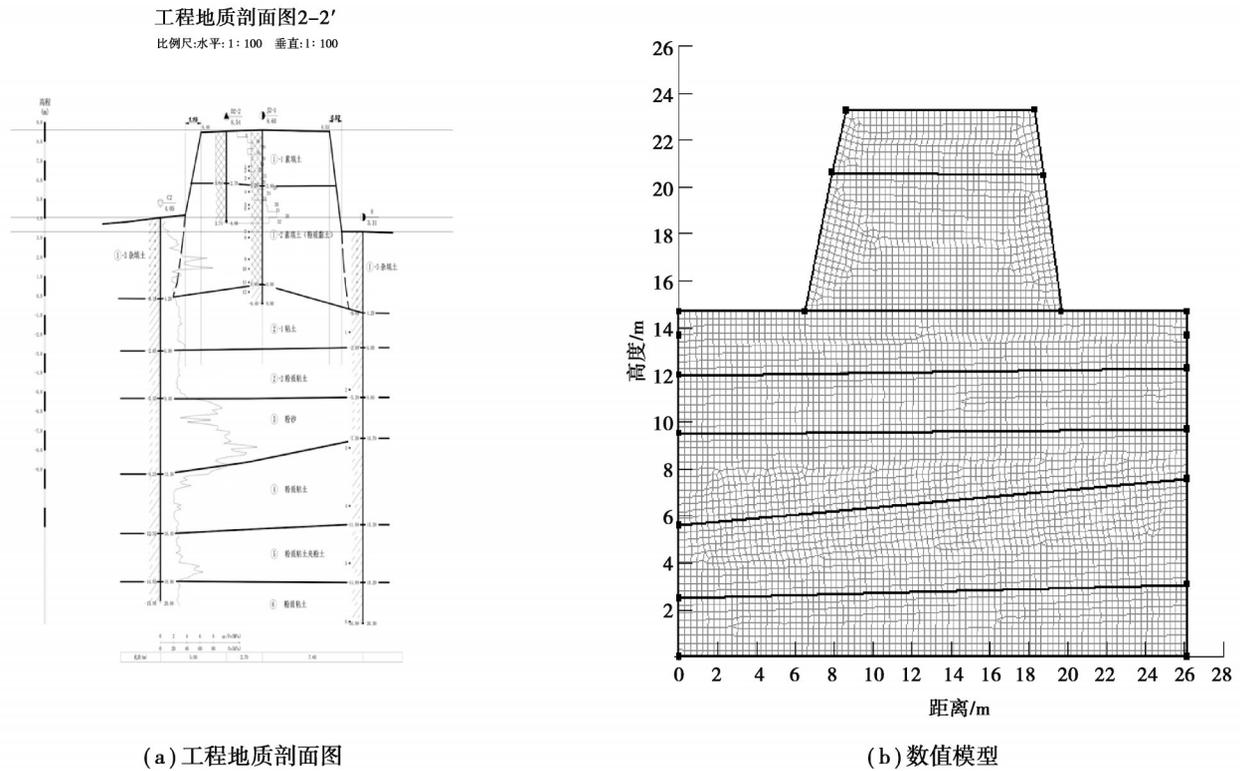


图 2 渗流分析计算模型

Fig. 2 Seepage analysis and calculation model

### 2.2 物理力学参数

对盘门城墙曲型断面土体进行了界限含水率试验、渗透试验、直剪试验等常规试验,试验方法参考《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>,得到土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	孔隙比 $e$	液限/%	塑限/%	渗透系数 $k_w/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
素填土	18.82	31.1	12.5	0.84	34.37	20.27	$1.62 \times 10^{-5}$
粉质黏土	19.22	44.9	13.8	0.77	36.04	20.23	$4.36 \times 10^{-6}$
黏土	19.39	48.1	14.6	0.75	36.69	20.03	
粉质黏土	18.84	29.4	13.6	0.83	33.83	19.45	
粉砂	18.69	2.2	29.0	0.83	30.25	20.55	
粉质黏土	18.68	26.5	13.3	0.86	33.88	19.94	
粉质黏土夹粉土	18.68	15.0	15.7	0.85	31.30	19.43	

### 2.3 土水特征曲线

非饱和土土水特征曲线的测量需要同时测量土体的含水率和吸力,文中采用滤纸法试验获得土水特征曲线,测得试验前后滤纸重量后根据率定曲线与换算公式得到不同体积含水率下基质吸力。

采用 van Genuchten 模型拟合土水特征曲线<sup>[20]</sup>,其表达式为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m, \quad \left( m = 1 - \frac{1}{n}, 0 < m < 1 \right), \quad (8)$$

式中: $\theta_r$ 为残余含水率; $\theta_s$ 为饱和含水率; $a$ 、 $n$ 、 $m$ 为拟合参数, $a$ 与进气值有关, $n$ 与粒径有关, $m$ 与曲线对称性有关。

建立四参数模型,对盘门城墙土体的土水特征曲线进行拟合,结果如图3所示。

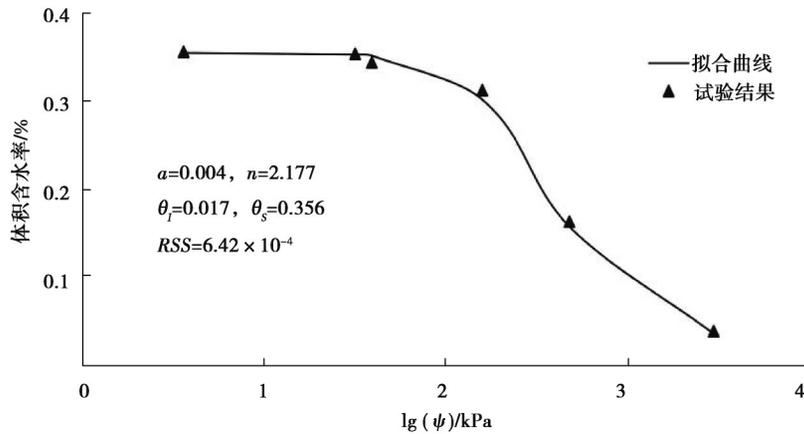


图3 土水特征曲线

Fig. 3 Soil water characteristic curve

由图3可以看出,当体积含水率较高时,基质吸力变化相对较小;当体积含水率较低时,基质吸力波动明显。体积含水率达到31.33%时,拐点出现,曲线开始线性下降。

#### 2.4 安全系数

参考《土工试验方法标准》对土体进行直剪试验,得到了不同含水率下基质吸力、黏聚力和内摩擦角,试验结果如表2所示。

表2 不同含水率下基质吸力和抗剪强度

Table 2 Matrix suction and shear strength under different volumetric water content

体积含水率/%	基质吸力/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
26.05	204.63	65.63	16.60
29.98	136.89	46.05	14.26
30.56	125.37	44.89	14.11
31.62	104.36	48.04	14.53
33.99	21.67	33.56	12.46

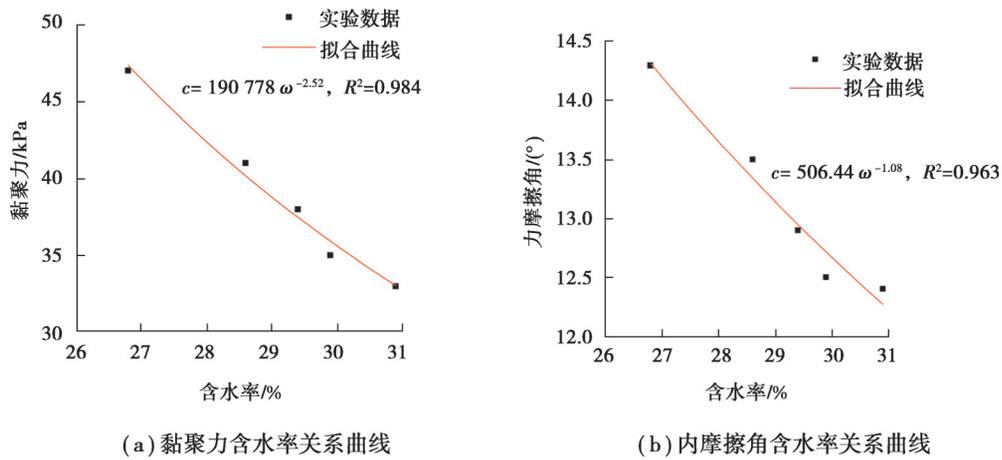
对不同含水率下抗剪强度指标进行回归分析,建立非线性拟合曲线模型,推导出抗剪强度指标与含水率拟合曲线如图4所示,拟合公式为

$$\begin{cases} c = 190\,778\omega^{-2.52}, \\ \phi = 506.44\omega^{-1.08}. \end{cases} \quad (9)$$

通过计算得到不同体积含水率下基质吸力、吸应力和转化率结果,如表3所示。对基质吸力与吸应力进行线性拟合,结果如图5所示。可以得到  $\tan \phi^b = 0.1772$ , 基质吸力对抗剪强度贡献对应的摩擦角为  $10.05^\circ$ 。

将所得结果整理代入式(7),可以得到基于含水率的安全系数表达式为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{a_i}} [W_i \tan(506.44\omega^{-1.08}) + 0.1772u_{si}b + (190778\omega^{-2.52})b_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i}. \quad (10)$$



(a) 黏聚力含水率关系曲线

(b) 内摩擦角含水率关系曲线

图 4 抗剪强度指标拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of the total Shear strength index

表 3 土样体积含水率、基质吸力、吸应力及转化率关系表

Table 3 The relationship table of soil sample volumetric water content, matrix suction, suction stress and conversion rate

体积含水率/%	基质吸力/kPa	吸应力/kPa	转化率/%
26.05	204.63	39.39	19.25
29.98	136.89	19.81	14.47
30.56	125.37	18.62	14.88
31.62	104.36	21.80	20.89
33.99	21.67	7.32	33.78

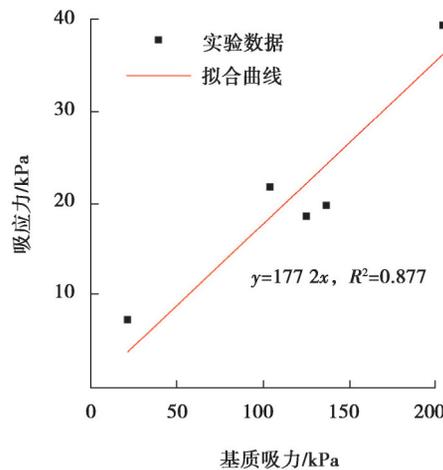


图 5 吸应力与基质吸力关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between suction stress and matrix suction

### 3 不同工况下城墙稳定性分析

为研究不同降雨作用对城墙稳定性及城墙内部孔隙水压力分布的影响,设计了3种不同降雨工况,分别为降雨时长工况、降雨强度工况及降雨模式工况。

#### 3.1 不同降雨时长的影响

设置5种不同的降雨强度,降雨时长分别为1、2、3 d,如表4所示。

表4 考虑降雨时长影响的计算工况

Table 4 Calculation conditions considering the influence of rainfall duration variation

降雨工况	降雨强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	降雨时长/d	累计雨量/mm
A1	30	1,2,3	30,60,90
A2	45	1,2,3	45,90,135
A3	60	1,2,3	60,120,180
A4	100	1,2,3	100,200,300
A5	150	1,2,3	150,300,450

图6为3 d内不同降雨强度下,城墙的稳定安全系数随降雨历时的变化曲线。当降雨历时相等时,雨强越大,安全系数越低。而在降雨强度不变时,城墙的稳定安全系数随降雨时长增加线性下降。用 $K_s = kt + d$  ( $K_s$ 为城墙稳定性安全系数, $k$ 为斜率, $d$ 为截距)对5种降雨强度下城墙稳定性安全系数进行拟合,得到不同降雨强度下安全系数随时间变化的关系式。

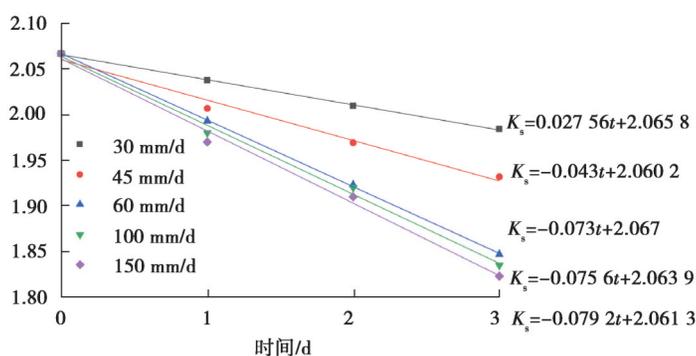


图6 不同雨强下历经3 d降雨城墙安全系数变化

Fig. 6 Variation of safety factor of city wall after three days of rainfall under different rainfall intensity

考虑到线性函数的斜率 $k$ 与降雨强度 $I$ 相关,提取不同降雨强度下安全系数变化的斜率,运用 $y = a(1 - e^{-bx})^c$ 的指数函数再次拟合,寻找安全系数与降雨强度之间的直接联系,拟合结果如图7所示。

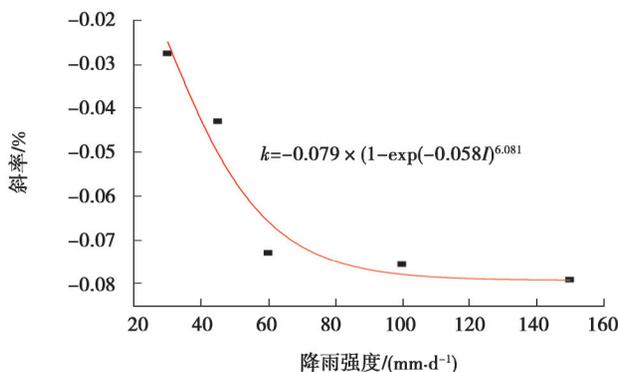


图7 降雨强度与斜率拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of rainfall intensity and slope

拟合得到斜率与降雨强度之间的关系式为

$$k = -0.079(1 - e^{-0.058I})^{6.081}, R^2 = 0.945. \quad (11)$$

将安全系数与降雨时长、安全系数下降速率与降雨强度整理得到城墙安全系数与降雨强度的预测曲线:

$$K_s = -0.079(1 - e^{-0.058I})^{6.081}t + 2.06, \quad (12)$$

式中: $I$ 为降雨强度,mm/d; $t$ 为降雨时长,d。城墙稳定性在不同降雨强度下线性下降,但下降幅度不大,这是

因为土体常年压实,渗透系数较小。

以强度为 30 mm/d 的降雨为例,经历不同时长的降雨后,城墙内部孔隙水压力随高程变化,如图 8 所示。由图可知,在降雨强度相同情况下,随着降雨时长的增加,城墙顶部孔隙水压力不断增大,经历 1、2、3 d 的降雨后,坡顶孔隙水压力由初始的 -93.76 kPa 分别达到了 -25.70、-13.26、-7.69 kPa。底部由于地下水位线较深且雨强较小的缘故,几乎没有变化。另一方面,随着降雨时长的增加,雨水入渗深度也随之增加,当历时为 1 d 时,入渗深度达到 2.4 m;而当历时为 3 d 时,入渗深度达到了 3.6 m。由于降雨强度均匀且雨量较小,雨水全部渗入土体,没有形成暂态饱和区,孔隙水压力变化均匀,只有入渗深度增加。

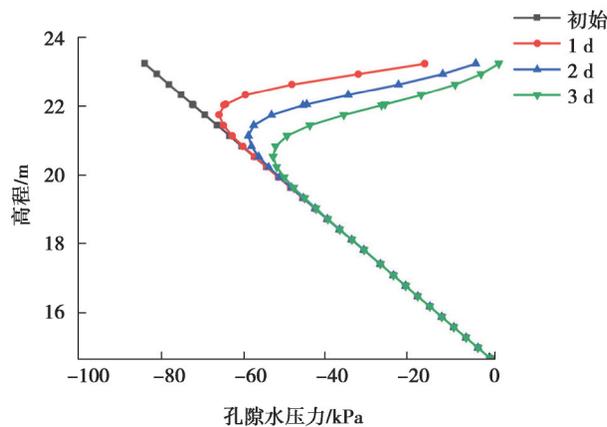


图 8 不同降雨历时下孔隙水压力随高程变化图

Fig. 8 Variation of pore water pressure with elevation under different rainfall duration

### 3.2 不同降雨强度影响

为研究不同降雨强度对城墙稳定性及城墙内部孔隙水压力分布的影响,设计了如表 5 所示的 4 种不同强度的降雨工况。将瞬态分析时长设置为 5 d,前 3 d 降雨,后 2 d 停雨。

表 5 考虑降雨强度变化影响的计算工况

Table 5 Calculation conditions considering the influence of rainfall intensity change

降雨工况	降雨强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	降雨时长/d	总降雨量/mm	降雨等级
B1	5	3	15	小雨
B2	15	3	45	中雨
B3	35	3	105	大雨
B4	95	3	285	暴雨

不同降雨强度下城墙土体稳定性安全系数变化如图 9 所示。可以看出,当降雨强度越大时,安全系数的变化越大,最终安全系数越小。不同降雨强度下城墙的初始安全系数均为 2.059,降雨期间安全系数不断下降,下降的幅度与降雨强度呈正相关。当降雨强度为小雨和暴雨时,第 3 d 时安全系数分别为 2.03 和 1.74。

降雨过程结束后,由于雨水不能快速排出,城墙的稳定性安全系数仍会继续下降,但下降速度明显减弱。城墙稳定性安全系数最小值并不是出现在降雨过程中,而是在雨后某一段时间,滞后于降雨,反映出降雨对层状边坡影响的滞后性。

图 10 为降雨结束时不同雨强下的孔隙水压力分布图。可以看出,当雨强较小时,孔隙水压力变化相对较小,坡顶初始孔隙水压力为 -93 kPa,而经历 3 d 的小雨后增长至 -64 kPa,历经 3 d 暴雨后,坡顶孔隙水压力为 0,表层土体已达到饱和状态。当雨强较小时,表层土体孔隙水压力变化较小,而当雨强为暴雨时,降雨结束后饱和区的深度已达到 2.4 m,入渗深度达到 5.43 m。

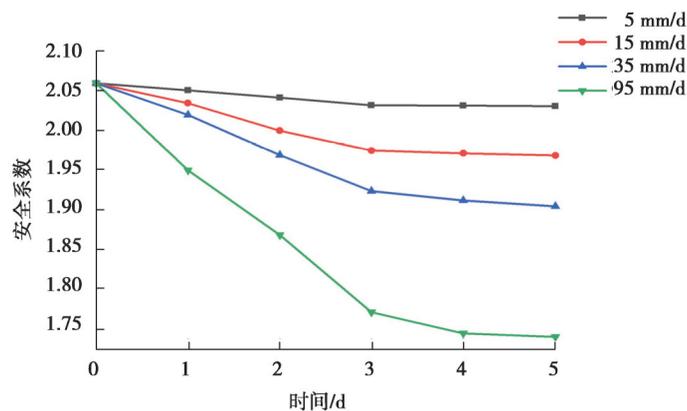


图9 不同降雨强度下城墙安全系数变化图

Fig. 9 Variation diagram of safety factor of city wall under different rainfall intensity

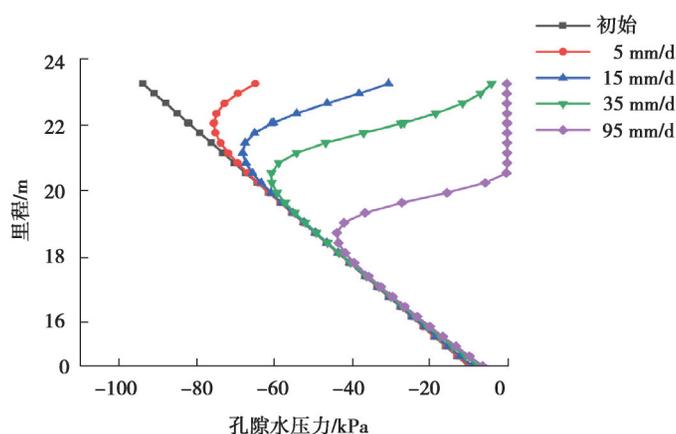


图10 不同雨强下降雨结束时的孔隙水压力分布图

Fig. 10 Pore water pressure distribution at the end of rainfall under different rainfall intensities

### 3.3 不同降雨模式影响

为比较不同降雨模式对城墙稳定性破坏,设置2组不同降雨模式。模式一,将降雨类型分为高强度短时间、低强度长时间与均匀型3种,具体如表6所示。

表6 不同降雨模式计算方案

Table 6 Calculation schemes of different rainfall modes

降雨工况	总降雨量/mm	降雨强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	降雨方案
高强度短时间	585	117.00	连续降雨5 d, 停雨38 d
低强度长时间	585	28.25	连续降雨20 d, 停雨23 d
均匀型	585	13.60	连续降雨43 d

3种不同的降雨模式下,城墙稳定性变化如图11所示,可以看出,高强短时和低强长时模式下,城墙稳定性安全系数都是降雨时下降,雨停后逐步上升。而均匀型降雨模式下,城墙稳定性不断下降,速度逐渐减缓。最低安全系数均是在雨停时出现,即高强度降雨的第5 d、低强度降雨的第20 d及均匀型的第43 d。3种降雨类型下城墙初始安全系数均为2.07;高强度、低强度降雨模式下,最低安全系数分别为1.70和1.69,均匀型最低安全系数为1.72。降雨结束后,安全系数缓慢回升,在第40 d时,高强短时和低强长时模式下安全系数分别回升至1.92和1.88。低强度长历时的降雨模式对黏土边坡安全性影响更大。

在总雨量相同的情况下,低强度长时间的降雨由于降雨强度小于土体入渗能力,雨水能够全部入渗,同时降雨时间长,土体从天然状态达到饱和状态的时间得到保证,破坏性更大。而高强度短时间的降雨由于雨

强较大,表层土体瞬间达到饱和状态,滑带土在降雨结束时还未达到饱和,安全系数降低幅度较小。

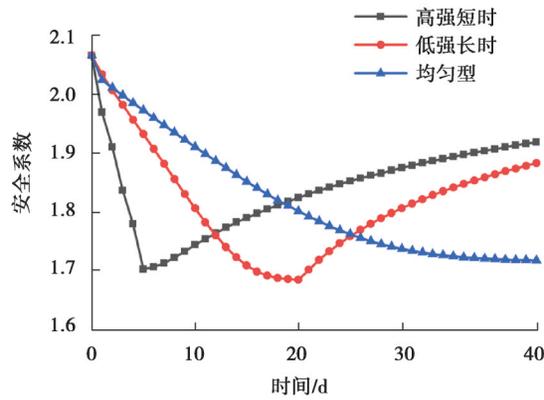


图 11 不同降雨模式下城墙安全系数变化

Fig. 11 Variation of safety factor of city wall under different rainfall modes

模式二,将降雨总量设置为 300 mm,降雨强度保持不变为 50 mm/d,降雨时长为 6 d,分析总时长为 18 d。设置 4 组计算方案,循环次数分别为 1 次、2 次、3 次和 6 次,具体如表 7 所示。

表 7 计算方案

Table 7 Calculation scheme

方案	总降雨量/mm	降雨强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	降雨方案	循环次数
方案一	300	50	连续降雨 6 d, 停雨 12 d	1
方案二	300	50	连续降雨 3 d, 停雨 3 d	2
方案三	300	50	连续降雨 2 d, 停雨 4 d	3
方案四	300	50	连续降雨 1 d, 停雨 2 d	6

4 种不同循环次数下城墙安全系数变化如图 12 所示。可以看出,4 种不同方案都存在滞后现象,城墙安全系数均在降雨期间不断下降,但最低安全系数出现在雨停后。循环次数超过 1 次时,安全系数呈阶梯型变化。同时,循环次数越多,最终安全系数越小。循环 1 次、2 次、3 次和 6 次时,最终安全系数分别为 1.823、1.798、1.791 和 1.787。

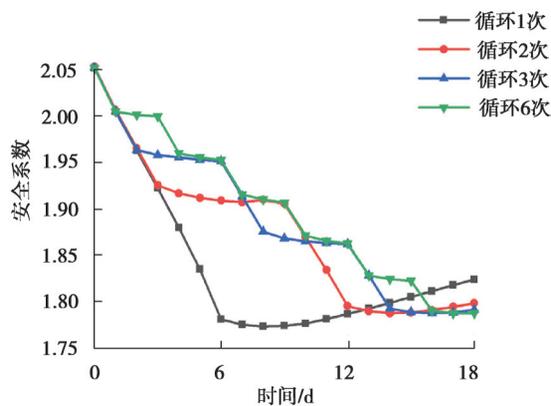


图 12 不同循环次数下城墙安全系数变化

Fig. 12 Variation of safety factor of city wall under different cycle times

图 13 为不同循环次数下最后一天降雨时的孔隙水压力分布图,即方案一的第 6 d,方案二的 12 d,方案三的第 14 d 和方案四的 16 d。可以看出,经历相同降雨量后,不同方案下城墙表层土体均达到了饱和。循环次数越多,饱和区深度越小,入渗深度越大。

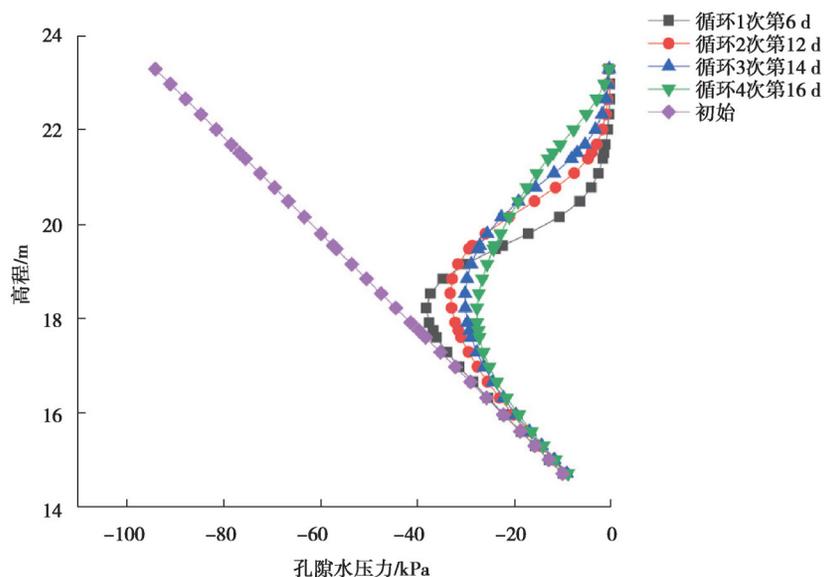


图13 不同循环次数下孔隙水压力分布

Fig. 13 Pore water pressure distribution under different cycles

#### 4 典型梅雨气候下城墙稳定性分析

每年6月中下旬至7月中上旬,长江中下游地区出现持续天阴有雨的自然现象称为梅雨。梅雨期间频繁的强降水过程不但会带来严重的洪涝灾害,同时使得坡体稳定性下降,严重时可能导致滑坡的发生。为了分析梅雨季频繁降水对城墙稳定性的影响,选取苏州2019年、2020年、2021年梅雨季节降雨量数据<sup>[21]</sup>。其中,2019年、2021年梅雨时间总计32 d,累计雨量分别为326.4、369.6 mm,2020年梅雨季时长43 d,降雨量累计585 mm。

图14~16为2019年—2021年城墙稳定性安全系数在梅雨季的变化。由图可知,梅雨季对城墙边坡稳定性有着严重影响,安全系数不断下降。梅雨季开始时城墙稳定性安全系数为2.07,结束时3个年份城墙稳定性安全系数分别为1.81、1.67和1.78。2019年与2021年相比,梅雨时长相同而总雨量不同,2021年总雨量更大,安全系数下降幅度也更大,达到14.0%,而2019年城墙稳定性安全系数与初始相比下降幅度为12.56%。2020年降雨时长与雨量都明显增加的情况下,安全系数下降幅度达到19.32%。

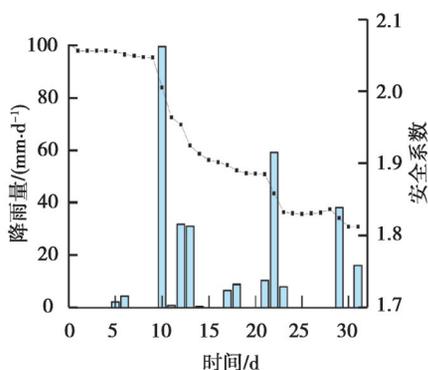


图14 2019年梅雨季城墙安全系数变化

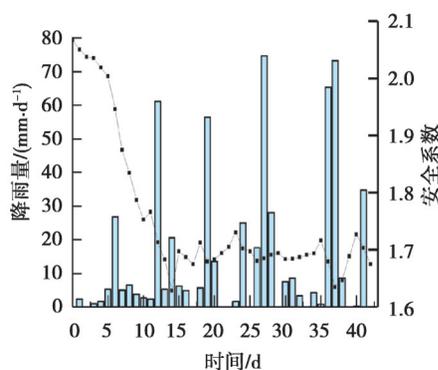


图15 2020年梅雨季城墙安全系数变化

Fig. 14 Changes in the safety factor of the city wall Fig. 15 Changes in the safety factor of the

选取2020年梅雨季为代表,分析城墙稳定性变化及孔隙水压力变化。2020年梅雨季中由于第36~38 d的雨量较大,3 d内累计雨量达到147.3 mm,造成安全系数持续下降,最低安全系数出现在第38 d。而一段时间的停雨或少量降雨,会导致安全系数轻微上升。在第31~35 d时,因5 d内降雨量较少,安全系数从1.683上升至1.693。

选取2020年梅雨季中第6 d、16 d、26 d和第36 d孔隙水压力与初始孔隙水压力进行比较,如图17所示。

可以看出,随着降雨的不断进行,孔隙水压力逐渐增大,表层土体开始饱和,边坡顶部初始孔隙水压力为 $-93\text{ kPa}$ ,经过一段时间的降雨后,初始孔隙水压力不断增大,第 26 d 时,表层土体达到了饱和,饱和区深度达到 $0.61\text{ m}$ ;第 36 d 时,饱和区深度达到了 $2.71\text{ m}$ 。由于持续降雨导致的水位线逐渐上升,坡底孔隙水压力也不断增大,在第 6 d 和 16 d 时,底部孔隙水压力与初始相比几乎没有变化,而到了第 36 d 时,底部孔隙水压力已由初始的 $-23.26\text{ kPa}$ 上升到 $-0.31\text{ kPa}$ ,接近饱和状态。

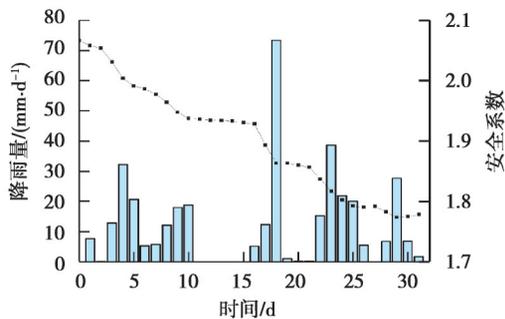


图 16 2021 年梅雨季城墙安全系数变化

Fig. 16 Changes in the safety factor of the city wall in the rainy season in 2021

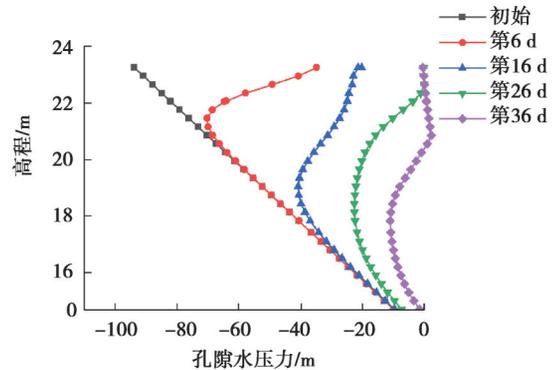


图 17 2020 年梅雨季不同时间孔隙水压力分布图

Fig. 17 Distribution map of pore water pressure at different times during the rainy season in 2020

综上所述,梅雨天气对城墙稳定性有着显著影响。梅雨季节降雨时间长、雨量大、时空分布不均匀,这些都对城墙稳定性造成危害。梅雨季城墙稳定性安全系数不断下降,下降幅度达到 $10\%\sim 20\%$ 。随着降雨的间歇进行,坡顶土体逐渐饱和,入渗深度持续增加,坡底土体也因为地下水位线上升达到,接近饱和状态。

## 5 结 论

文中以城墙为研究对象,通过常规实验和数值模拟等手段,对不同工况下的城墙稳定性进行计算,得到以下结论:

1) 通过试验得到了城墙土体的物理力学参数和土水特征曲线。以非饱和土抗剪强度理论为基础,结合直剪试验结果,提出了以含水率为变量的抗剪强度公式,得到了不同体积含水率下基质吸力和吸应力的转化率,揭示了含水率变化对抗剪强度的影响。

2) 对不同降雨时长、不同降雨强度、不同降雨模式和降雨工况,基于简化 Bishop 法对城墙安全系数进行计算,结果表明,降雨强度不变时,城墙的稳定安全系数随降雨时长增加线性下降。运用对数函数进行拟合,得到了盘门城墙稳定性安全系数随降雨强度与降雨时长变化的预测曲线。雨停后城墙稳定性仍在下降,但下降速度减缓。

3) 相同降雨量的情况下,低强度长时间的降雨模式对城墙稳定性影响更大,应当提防此种降雨模式。降雨量与降雨时长相等时,循环次数越多,最终安全系数越小,入渗深度随循环次数增加而增大。

4) 选取 2019 年—2021 年苏州梅雨季对城墙稳定性进行分析,发现梅雨季城墙稳定性安全系数不断下降,下降幅度达到 $10\%\sim 20\%$ 。随着降雨的间歇进行,边坡顶部孔隙水压力不断增大直至饱和,饱和区深度与入渗深度也不断增加。城墙底部孔隙水压力也因为连续不断的降雨带来的地下水位线上升而显著增大,到达接近饱和状态。

## 参考文献

- [ 1 ] 吴超英,李乐,王峥嵘,等.古城墙变形破坏模式分类及识别[J].工程地质学报,2017,25(4):1132-1140.  
Wu C Y, Li L, Wang Z R, et al. Classification and identification of failure modes of ancient city walls[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1132-1140.(in Chinese)
- [ 2 ] Yu S, Zhang J, Ren X. Numerical analysis of the seepage characteristics of slopes with weak interlayers under different rainfall levels[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(5): 12465-12478.
- [ 3 ] 谌文武,张燕芳,范文军,等.灌溉诱发夯土长城遗址失稳模型试验研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(2):233-

- 237, 243.
- Chen W W, Zhang Y F, Fan W J, et al. Model test study on the instability of rammed earthen sites induced by irrigation[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57(2): 233-237, 243.(in Chinese)
- [ 4 ] 岳建伟, 李嘉乐, 王思远, 等. 定远营遗址稳定性和微观劣化的研究[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(10): 4159-4166.
- Yue J W, Li J L, Wang S Y, et al. The stability and micro deterioration of dingyuaning Ruins[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(10): 4159-4166.(in Chinese)
- [ 5 ] 孔德政, 石玉成, 梁庆国, 等. 地震作用下不同类型夯土长城的动力响应及稳定性分析[J]. *地震研究*, 2018, 41(2): 328-336, 344.
- Kong D Z, Shi Y C, Liang Q G, et al. Dynamic response analysis and seismic stability of the rammed great wall of different types under earthquake action[J]. *Journal of Seismological Research*, 2018, 41(2): 328-336, 344.(in Chinese)
- [ 6 ] 周长东, 李艺敏. 降雨入渗对故宫城墙稳定性的影响[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(S1): 286-296.
- Zhou C D, Li Y M. Influence of rainfall infiltration on stability of Forbidden City wall[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S1): 286-296.(in Chinese)
- [ 7 ] 王思远, 岳建伟, 王永锋, 等. 卫辉共城遗址土性能及稳定性研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(4): 51-57.
- Wang S Y, Yue J W, Wang Y F, et al. Study on soil properties and stability of Gongcheng Site in Weihui city[J]. *Building Structure*, 2021, 51(4): 51-57.(in Chinese)
- [ 8 ] Chen W W, Zhang Y M, Zhang J K, et al. Consolidation effect of composite materials on earthen sites[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 730-737.
- [ 9 ] Bui T, Bui Q, Limam A, et al. Modeling rammed earth wall using discrete element method[J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2016, 28(1): 523-538.
- [ 10 ] Zhu J Y, Tong L P, Li R X, et al. Annual thermal performance analysis of underground cave dwellings based on climate responsive design[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 1633-1646.
- [ 11 ] El Nabouch R, Bui Q B, Plé O, et al. Rammed earth under horizontal loadings: proposition of limit states[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 238-244.
- [ 12 ] Wang X D, Zhang B, Pei Q Q, et al. Experimental studies on sacrificial layer in conservation of earthen sites[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2020, 41: 74-83.
- [ 13 ] 彭守建, 吴善康, 许江, 等. 不同降雨强度下滑坡表面冲刷体积试验[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(2): 105-112.
- Peng S J, Wu S K, Xu J, et al. Experiments of soil erosion under different rainfall intensities on slope surface[J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(2): 105-112.(in Chinese)
- [ 14 ] 陈朝晖, 黄景华, 秦文涛, 等. 饱和渗透系数空间变异性对边坡稳定性的影响[J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(3): 59-69.
- Chen Z H, Huang J H, Qin W T, et al. Effects of the spatial variability of saturated permeability on the slope stability[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(3): 59-69.(in Chinese)
- [ 15 ] 卢玉林, 薄景山, 陈晓冉, 等. 考虑渗流和地震时的砂土边坡稳定性计算[J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(1): 65-75.
- Lu Y L, Bo J S, Chen X R, et al. Calculation of sand slope stability with considering seepage and earthquake[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(1): 65-75.(in Chinese)
- [ 16 ] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318-333.
- [ 17 ] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(3): 313-321.
- [ 18 ] Sheng K, Hong B N, Liu X, et al. Modified Bishop method for stability analysis of weakly sloped subgrade under centrifuge model test[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2021, 15(3): 727-741.
- [ 19 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Geotechnical test standard: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.(in Chinese)
- [ 20 ] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [ 21 ] 中华人民共和国国家统计局. 中国气象年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China meteorological yearbook[M]. Beijing: Meteorological Press, 2020. (in Chinese)