

DOI: 10.11779/CJGE202003006

降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究

刘 畅^{1,2}, 季凡凡¹, 郑 刚^{1,2}, 刘 涛^{1,4}, 刘永超³

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 天津市桩基技术工程中心, 天津 300301; 4. 北京龙湖中佰置业有限公司, 北京 100020)

摘 要: 降雨通常易导致土质边坡的滑动、失稳, 降雨对基坑特别是软土条件下的基坑的影响研究较少。针对天津市某基坑展开实测, 开挖结束后在没有其他施工条件下, 连续 3 d 247 mm 降雨导致基坑支护桩顶水平位移增加 13.75 mm, 因此研究降雨入渗诱发软土基坑变形的机理具有十分重要的意义。首先进行降雨的入渗深度及对非饱和黏土物理力学性质影响室内试验, 在此基础上结合工程实测, 采用 Plaxis2D 有限元分析软件建立二维软土基坑模型, 分析了降雨对软土基坑支护结构变形的影响机理, 主要对比了降雨强度、降雨时长、降雨量对基坑支护结构变形的影响, 以及开挖深度、桩顶初始位移、支护形式不同对降雨的敏感程度。结果表明: 降雨对软土基坑支护结构变形影响主要因素为坑外杂填土重度增加、坑内土体软化、渗流作用, 降雨量是对基坑支护变形影响较大的因素; 降雨产生的支护结构位移增量受支护结构初始位移影响最大, 而基坑开挖深度对相同降雨条件下支护结构变形增量影响差异不大。

关键词: 降雨; 软土; 基坑; 支护结构

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)03-0447-10

作者简介: 刘 畅(1974—), 女, 副教授, 博士, 主要从事桩基础、基坑工程、地下工程研究工作。E-mail: lclc74@163.com。

Measurement and mechanism of influences of rainfall on supporting structures of foundation pits in soft soils

LIU Chang^{1,2}, JI Fan-fan¹, ZHENG Gang^{1,2}, LIU Tao^{1,4}, LIU Yong-chao³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Pile Foundation Technology Engineering Center, Tianjin 300301, China; 4. Beijing Longhu Zhongbai Real Estate Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: Rainfall is usually easy to cause sliding and instability of soil slopes. At the same time, it also has a great influence on foundation pits, especially for those in soft soils. In the absence of other construction, after three days of rainfall of 247 mm deep, the horizontal displacement of supporting structures of a foundation pit in Tianjin increases by 13.75 mm. Therefore, it is of great significance to study the mechanism of deformation induced by rainfall of foundation pits in soft soils. Firstly, the experiments on the influences of rainfall on relevant model are conducted by using Plaxis2D. The influence mechanism of rainfall on the deformation of supporting structures of the foundation pit in soft soils is analyzed. The influences of intensity, duration and amount of rainfall on the deformation of supporting structures are analyzed, and the sensitivities of the excavation depth, the initial displacement of pile top, the form of supporting structures to rainfall are studied. The main factors affecting the deformation of supporting structures are the increase of the residual soils outside the pit, the softening of the soils in the pit and the fluid-solid coupling. The amount of rainfall is a factor to have a large influence on the deformation of the supporting structures of the foundation pit. The displacement increment of the supporting structures caused by rainfall is most affected by their initial displacement, while the depth of foundation excavation has small influences on their deformation increment under the same rainfall conditions.

Key words: rainfall; soft soil; foundation pit; supporting structure

0 引 言

在基坑施工过程中, 降雨对基坑的安全影响较大, 尤其对于软土基坑, 土的含水率高、抗剪强度低, 受力和变形易受外界环境影响, 降雨会使软土基坑的支

护结构变形增大、整体安全性降低, 存在基坑倒塌的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB732106); 国家自然科学基金项目(51108312)

收稿日期: 2018-12-24

危险。目前学术界对降雨造成的基坑支护结构变形影响研究相对较少，更多的学者关注降雨对非饱和土边坡的研究^[1-9]，少量的学者对有支护的基坑在降雨条件下的变形和稳定性做了分析^[10-13]。李炎隆等^[9]基于 ABAQUS 有限元软件进行降雨条件下渗流场有限元数值计算，分析研究了基坑边坡的稳定性。邱海兵^[10]结合西安某基坑工程以 MIDAS 有限元软件数值模拟，分析了暴雨和连阴雨对非饱和土基坑变形和稳定性的影响。崔凤展^[11]采用 FLAC3D 数值模拟和现场监测相结合的方法分析了强降雨条件下无支护与设计支护状态下的基坑边坡水平位移的变化规律和基坑稳定性，提出强降雨条件下深基坑的稳定控制措施。周根郊^[12]结合现场试验监测，利用 FLAC3D 分析了成都膨胀土基坑边坡降雨条件与支护结构内力的关系，提出降雨入渗后土体强度衰减参数的取值问题。笔者研究降雨对软土基坑支护结构的变形一方面可以补充降雨对基坑稳定性影响研究的成果，另一方面可以为软土基坑雨季条件下施工做出预防措施，防止基坑出现大变形甚至倒塌的事故。

本文结合天津市某基坑工程实测，针对降雨对非饱和黏土物理力学性质影响进行室内降雨试验，研究基坑开挖至坑底后，无其他施工条件，降雨作用下的基坑支护结构变形问题，通过 Plaxis2D 有限元分析软件建立二维软土基坑模型，与工程实测数据对比，分析降雨因素和基坑参数因素对降雨后支护结构变形增量影响，为基坑支护设计提供理论支持和科学依据。

1 工程案例

1.1 工程概况

天津市某基坑工程场地土层分布及支护形式、开挖深度如图 1 所示。基坑开挖深度为 4.9 m，采用截面尺寸 500 mm×375 mm 的 C80 预应力混凝土矩形空心桩，桩内径 210 mm、桩长 12 m，间距 0.6 m，顶部向坑外 8° 倾斜。护坡采用 70 mm 厚喷射混凝土，混凝土强度等级 C20，内配置单层双向 Φ4@250 钢筋网片，止水帷幕采用 Φ700@1000 双轴水泥土搅拌桩。地表至坑底土层分布为：①₁ 杂填土、①₂ 素填土、③₁ 黏土、③₃ 淤泥质黏土、⑥₁ 粉质黏土、⑦ 粉质黏土、⑧₁ 粉质黏土。

1.2 工程实测结果

基坑在 7 月 12 日开挖至坑底，在之后 20 d 内无其他施工，期间遇到 3 次降雨，降雨时间为①7 月 19—21 日；②7 月 24—25 日；③7 月 30 日。其中，7 月 19—21 日降雨强度最大，3 d 降雨量 247 mm。以开挖至坑底桩顶水平位移 34.03 mm 为基准，后期测试桩桩顶水平位移增量如表 1 及图 2 所示。

表 1 测试桩桩顶水平位移增量

监测日期	桩顶水平位移增量/mm	日均增量/(mm·d ⁻¹)	降雨情况
7月12日	0	2.29	无降雨
7月15日	6.86	0.86	无降雨
7月18日	9.44	3.44	降雨
7月22日	23.19	1.89	降雨
7月25日	28.84	0.70	无降雨
7月28日	30.94	1.33	降雨
8月3日	38.92		

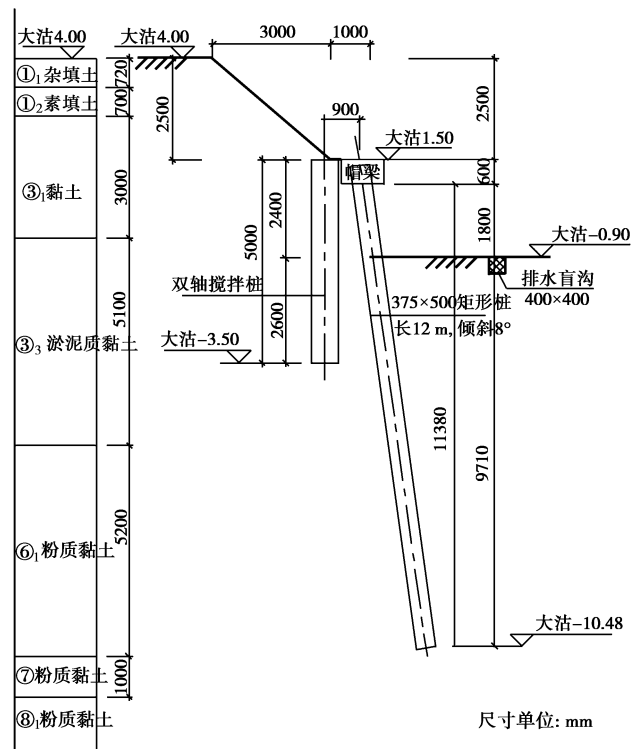


图 1 基坑剖面图

Fig. 1 Profile of foundation pit

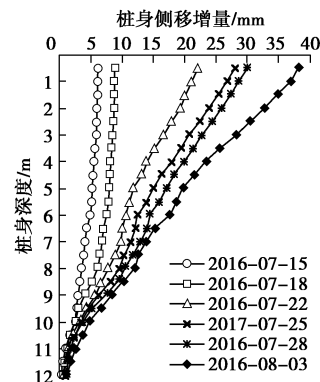


图 2 不同时间实测桩身侧移增量

Fig. 2 Measured increments of lateral displacement of pile at different time

结合表1和图2可以发现, 基坑开挖至坑底后的3d内桩顶水平位移增量较大, 分析是开挖初期蠕变和固结作用的影响, 其后的半个月时间内, 无降雨时段基坑位移日增量小于1mm/d, 但3次降雨后位移均明显增大, 根据降雨强度不同, 位移增量在1.33~3.44mm/d。可以看出, 降雨会导致基坑的支护结构变形显著增大。

2 黏土降雨入渗室内试验

基坑开挖至坑底, 坑内地下水位以上土体为非饱和土, 降雨作用下水入渗到土中, 土体强度降低, 坑内土压力减小, 支护结构向坑内发生变形。为模拟降雨后土体的软化, 进行室内黏土降雨试验, 研究土体入渗深度及强度参数变化规律。

2.1 试验原理

(1) 饱和-非饱和渗流理论

达西定律是研究多孔介质中饱和流体渗流理论的基本方程, Richards通过研究流体通过多孔介质中毛细管的传导作用, 认为达西定律可以引申用于非饱和和带水的运动, 但此时的渗透系数 k 不再是一个常数, 而是与土的含水率相关, 将扩展后的达西定律引入渗流连续性方程得到以下方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (1)$$

表2 降雨试验方案

Table 2 Test plans of rainfall

控制变量	降雨强度 (mm·h ⁻¹)	降雨类型	降雨持时 /h	总降雨量 /mm	降雨间隔时间 /min	降雨 次数	每次降雨量 /g
降雨时长	1.25	中雨	6	7.5	5	72	4.71
	1.25	中雨	12	15	5	144	4.71
	1.25	中雨	24	30	5	288	4.71
降雨强度	0.4	小雨	12	4.8	5	144	1.51
	1.25	中雨	12	15	5	144	4.71
	2.5	大雨	12	30	5	144	9.42
降雨强度	1.25	中雨	28.8	36	5	346	4.71
	2.5	大雨	14.4	36	5	173	9.42
	6	暴雨	6	36	5	144	11.31

表3 不同含水率黏土的初始物理力学性质

Table 3 Initial physical and mechanical properties of clays with different water contents

含水率 w	饱和度 S_r	重度 (kN·m ⁻³)	w_p /%	w_L /%	I_p	I_L	固结快剪		压缩模量 E_s /MPa
							黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	
25%	70.1%	17.3					22.91	17.70	8.2
30%	84.1%	17.9	27.8	46.5	18.7	0.67	13.86	14.61	6.9
35%	98.0%	18.6					11.84	12.52	4.3

(2) 土的抗剪强度指标随含水率变化的理论

饱和土的破坏准则一般采用莫尔-库仑强度准则进行计算, 在考虑孔隙水压力和基质吸力后, 得到扩展的莫尔-库仑强度准则:

$$\tau_f = c' + (\sigma_v - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2)$$

式中, c' 为与净法向应力和吸力相关的有效黏聚力, ϕ' 为与净法向应力相关的有效内摩擦角, σ_v 为总的正应力, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力, ϕ^b 为与吸力相关的有效内摩擦角, f 为下标指破坏状态, ϕ^b 可采用以下公式进行计算:

$$\tan \phi^b = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (3)$$

根据以上饱和-非饱和渗流、土抗剪强度指标随含水率变化理论, 笔者自行设计室内降雨试验, 研究降雨对不同饱和度土体影响深度和强度参数变化规律。

2.2 试验方案

取天津市津南区咸水沽镇的黏土进行烘干研磨, 过5mm筛对土体进行过滤。制备土体的含水率控制为25%, 30%, 35%, 采用分层喷雾洒水搅拌, 将搅拌后的土体放入封闭的塑料袋内静置3d, 使土中的水分充分的迁移, 保证土体的含水率均匀。然后将土体填筑到高60cm、外径25cm、内径24cm的有机玻璃管内, 管内表面和底面涂抹凡士林, 作为隔水边界条件并防止水沿侧壁下漏, 分层填实, 控制干密度在1.38g/cm³, 填筑40cm高, 最后在土柱上铺设5cm砂层,

静置固结一周。

降雨装置^[14]采用加压喷壶，喷头为雾化喷水式，能均匀喷洒在土柱上。试验方案如表 2 所示，分为 1.25 mm/h 降雨强度不同降雨时长、降雨 12 h 不同降雨强度以及降雨量 36 mm 不同降雨工况三大类降雨模式。不同含水率土体降雨前物理力学性质如表 3 所示。

2.3 试验现象及分析

试验数据整理中将初始含水率为 25%，30%，35% 的土柱分别表示为土柱 I、II、III，整理各土柱在 3 种降雨模式下的的含水率、黏聚力、内摩擦角和压缩模量分布如图 3~5 所示。

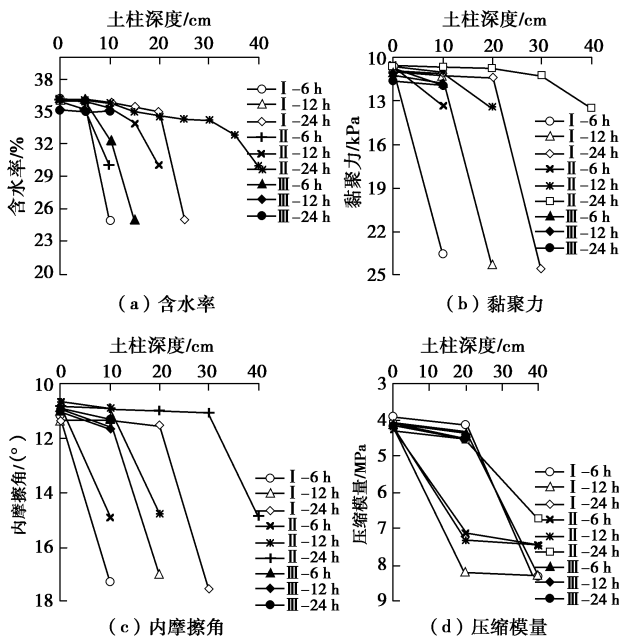


图 3 中雨强度不同降雨时长的不同土柱含水率及强度参数
Fig. 3 Water contents and strength parameters of different soil columns under different rainfall durations at rainfall intensity of 1.25 mm/h

根据图 3 可以看出，在中雨强度下，随降雨时长由 6 h 增加至 12，24 h，土体入渗深度增加，在入渗深度内含水率增加，黏聚力与内摩擦角、压缩模量降低，说明土体强度参数的改变主要是由于土柱不同深度处含水率的变化。

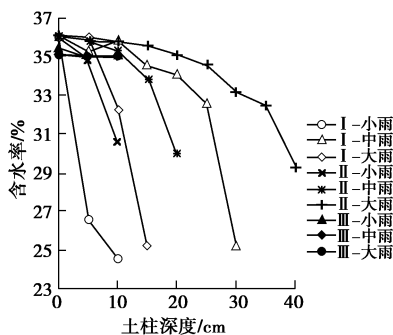


图 4 12 h 降雨时长不同降雨强度下不同土柱的含水率
Fig. 4 Water contents of different soil columns under different rainfall intensities at rainfall duration of 12 h

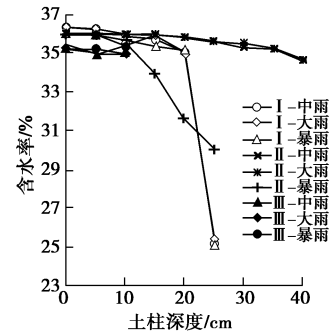


图 5 36 mm 降雨量不同降雨强度下的不同土柱含水率

Fig. 5 Water contents of different soil columns under different rainfall intensities of rainfall 36 mm deep rainfall

图 4 和图 5 分别是降雨 12 h，小、中、大雨 3 种降雨强度和降雨量 36 mm，中、大、暴雨 3 种降雨工况的两种降雨方案下土柱深度的含水率分布图。图 6 为各土柱在 1.25 mm/h (中雨) 降雨 6，12，24 h 条件下的积水现象，可直观发现土柱 I (含水率 25%)、土柱 II (含水率 30%) 随降雨时长增加，土柱没有积水，而土柱 III (含水率 35%) 积水量一直增加。

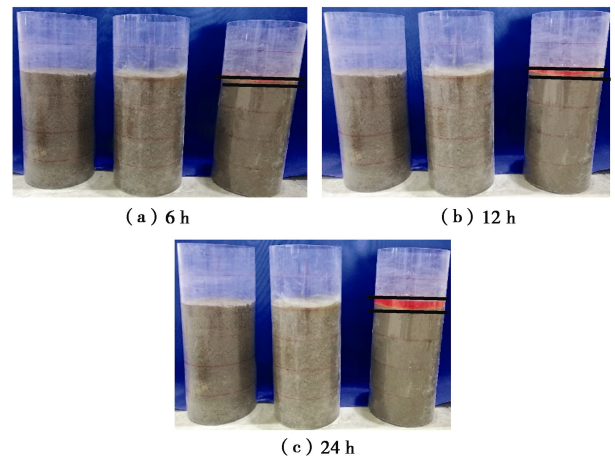


图 6 中雨强度不同降雨时长土柱 I、II、III 积水现象

Fig. 6 Water accumulation of soil columns I, II and III under different rainfall durations at rainfall intensity of 1.25 mm/h

表 4 为不同降雨方案下不同土柱积水、入渗深度，从表中可以得到，土柱 I 在 4 种工况下均无积水，说明土柱 I 的渗透能力大于 6 mm/h；土柱 III 在 4 种工况下均有积水，说明土柱 III 渗透能力低于 0.4 mm/h；土柱 II 在大雨、中雨、小雨工况下无积水，在暴雨工况下有积水，说明土柱 II 的渗透能力介于 2.5 mm/h 与 6 mm/h 之间。表 5 给出了土柱入渗深度内土体物理力学性质参数改变，从表中可以得到，在雨水入渗深度内，饱和度 70% 的土体黏聚力降低 50%、内摩擦角降低 30%、压缩模量降低 48%；饱和度为 84% 的土体黏聚力降低 15%、内摩擦角降低 14%、压缩模量降低 38%。

表 4 不同降雨方案下不同土柱积水、入渗深度

Table 4 Water accumulations and infiltration depths of different soil columns under different rainfall schemes

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨类型	降雨时长/h	降雨量/mm	积水深度/mm			入渗深度/cm		
				土柱 I	土柱 II	土柱 III	土柱 I	土柱 II	土柱 III
1.25	中雨	6	7.50	0	0	6.48	5	10	0
1.25	中雨	12	15.00	0	0	12.96	10	20	0
1.25	中雨	24	30.00	0	0	25.92	20	40	0
0.40	小雨	12	4.80	0	0	2.76	5	10	0
2.50	大雨	12	30.00	0	1.20	27.96	10	20	0
1.25	中雨	28.8	36.00	0	0	31.10	20	40	0
2.50	大雨	14.4	36.00	0	1.44	33.55	20	40	0
6.00	暴雨	6	36.00	0	21.60	34.98	20	20	0

表 5 土柱入渗深度范围内土体物理力学参数改变

Table 5 Change of physical and mechanical parameters of soil in soils column infiltration depth

初始饱和度 S_r	重度 γ /(kN·m ⁻³)			黏聚力 c /kPa			内摩擦角 φ (°)			压缩模量 E_s /MPa		
	降雨前	降雨后	增幅	降雨前	降雨后	减幅	降雨前	降雨后	减幅	降雨前	降雨后	减幅
70%	17.3	18.7	7.5%	22.91	11.79	50%	17.7	12.46	30%	8.2	4.2	48%
84%	17.9	18.6	3.9%	13.86	11.65	15%	14.61	12.45	14%	6.9	4.3	38%
98%	18.6	18.7	0.5%	11.84	11.62	1.9%	12.52	12.51	0.1%	4.3	4.2	2.3%

表 6 土体计算物理力学指标

Table 6 Computational physical and mechanical indexes of soil

层号	土层厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	E_{50}^{ref} /(N·mm ⁻²)		E_{oed}^{ref} /(N·mm ⁻²)		E_{ur}^{ref} /(N·mm ⁻²)		G_0^{ref} /(N·mm ⁻²)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角/(°)	K_H /(m·d ⁻¹)	K_V /(m·d ⁻¹)
① ₁ 杂填土	0.72	16.00	2.0	2.0	16.0	48	8	10	8.64 × 10 ⁻¹	8.64 × 10 ⁻¹			
① ₂ 素填土	0.70	18.88	3.5	3.5	28.0	84	20	8	8.64 × 10 ⁻⁴	8.64 × 10 ⁻⁵			
③ ₁ 黏土	3.48	18.61	4.2	4.2	33.6	100	16.45	12.52	8.64 × 10 ⁻⁵	8.64 × 10 ⁻⁵			
③ ₃ 淤泥质黏土	5.10	18.30	3.0	3.0	24.0	72	9	10.5	8.64 × 10 ⁻⁵	6.70 × 10 ⁻⁵			
⑥ ₁ 粉质黏土	10	19.24	6.0	6.0	36.0	90	15	21.19	3.71 × 10 ⁻³	2.78 × 10 ⁻⁴			

表 7 淤泥质黏土饱和/非饱和土体参数

Table 7 Parameters of silt clay saturated/unsaturated soils

饱和度 S_r	土层厚度 /m	重度/(kN·m ⁻³)	E_{50}^{ref} /(N·mm ⁻²)	E_{oed}^{ref} /(N·mm ⁻²)	E_{ur}^{ref} /(N·mm ⁻²)	G_0^{ref} /(N·mm ⁻²)	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
80%	1.0	17.3	5.2	5.2	41.6	124.8	13.5	12.62
100%	1.0	18.2	3.0	3.0	24.0	72.0	9.0	10.50

3 数值模拟分析

3.1 有限元数值模型

根据基坑土层分布, 土体材料参数取值如表 6 所示。同时根据前述试验结论, 基坑开挖至坑底后坑内地下水位以上的土体饱和度为 80%, 参照表 5 对饱和度 70%, 84% 的土体入渗规律采用线性内插法, 得到坑内地下水位以上土体参数如表 7 所示。

根据基坑工程实际, 采用 Plaxis2D 有限元软件建立如图 7 所示的有限元模型, 计算域 70 m (长) × 20 m (高), 基坑深 4.9 m, 围护结构后方土体长 30 m; 土体材料模型选择以莫尔-库仑屈服准则为破坏标准的小应变土体硬化模型 (HSS), 排水类型为不排水 (A), 基坑范围内共 5 层土。桩用板单元模拟, 数值

模拟参数见表 6, 桩土接触采用 interface 单元, 模型为平面应变模型, 单元为 15 节点单元; 基坑主动区地下水位位于地表以下 2 m 处, 被动区地下水位位于坑底以下 1 m 处, 地下水位模拟通过控制水头实现。

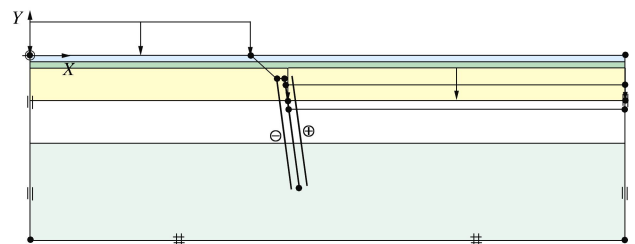


图 7 有限元计算模型

Fig. 7 Finite element model

3.2 降雨对软土基坑支护结构变形影响机理分析

开挖前由于基坑降水, 基坑被动区土体一定深度内变为非饱和土体。开挖结束, 暴露的基坑受降雨影响, 雨水从基坑土体表面不断入渗, 表层暂态饱和区逐渐向下扩展, 地下水位升高, 土体强度降低; 降雨使基坑发生瞬态渗流, 产生一定的附加渗流力, 增大基坑主、被动区水头差; 雨水渗入渗透系数较大杂填土层, 导致坑外杂填土层重度增加; 急降雨导致坑内外存在积水荷载。为研究降雨对基坑的影响因素, 现针对3 d 247 mm (暴雨) 的降雨, 分别针对以上5个方面分析降雨对基坑支护结构变形、受力的影响机理。

(1) 坑内土体软化影响分析

坑内地下水位在坑底以下1 m处, 地下水位以上为非饱和土, 根据室内降雨试验结果, 坑内淤泥质黏土入渗深度1 m, 入渗深度内土体物理力学参数如表7所示。整理数据得到坑内桩侧水土压力的分布(图8)以及土体软化前后的桩身侧移(图9)。

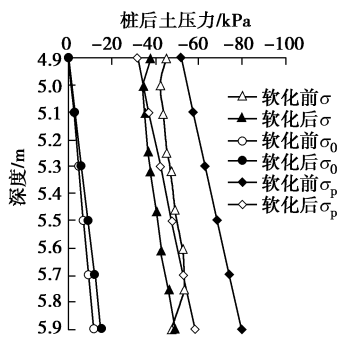


图8 坑内1 m 桩侧水土压力

Fig. 8 Earth pressures on pile in foundation pit

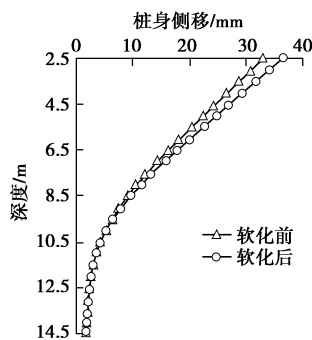


图9 软化前后桩身侧移

Fig. 9 Lateral movements of pile before and after softening

坑内水土压力在坑底以下1 m 范围内发生变化, 软化前坑内水土压力明显大于软化后的坑内水土压力, 基坑支护结构发生向坑内的变形, 由基坑开挖至坑底的32.9 mm增加3.5 mm至36.5 mm, 增加了10%。

(2) 坑外杂填土重度增加影响分析

杂填土性质较差, 强度较低, 本文对杂填土在降雨后只改变重度, 由非饱和时候的16 kN/m³改为降雨

后的19.5 kN/m³。整理计算结果得到杂填土重度增加前后的桩身侧移、弯矩, 如图10所示。

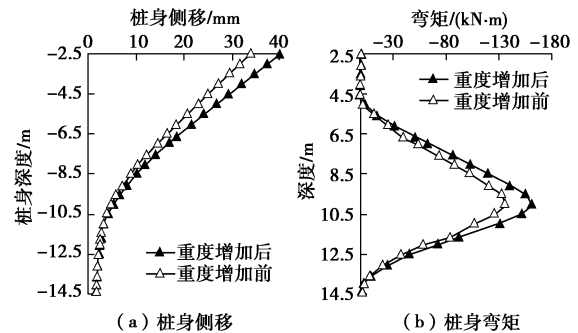


图10 坑内土体软化前后桩身侧移及弯矩

Fig. 10 Lateral movements and bending moments of pile before and after softening

杂填土重度增加, 坑外桩侧水土压力增加, 基坑支护结构向坑内发生变形。桩顶水平位移由32.9 mm增至降雨后的38.8 mm, 增加17%。

(3) 积水荷载影响分析

工况1: 坑外积水, 坑内无积水, 坑外施加2.5 kPa积水荷载; 工况2: 坑内积水, 坑外无积水, 坑内施加2.5 kPa积水荷载; 工况3: 坑内积水, 坑外积水, 坑内外同时施加2.5 kPa积水荷载。整理计算结果得到3种积水工况下桩顶水平位移如表8所示。

表8 不同积水工况桩顶水平位移

Table 8 Horizontal displacements of pile top under different water accumulation conditions

积水工况	桩顶水平位移/mm	桩顶水平位移增量/mm	桩顶水平位移增幅/%
工况1	39.85	6.17	18
工况2	33.64	-0.04	0
工况3	37.42	3.73	11

主动区施加积水荷载, 坑外桩侧水土压力增大, 桩向坑内发生变形; 仅在坑内施加荷载, 坑内外的桩侧水土压力变化很小, 可忽略不计; 坑内外积水荷载同时施加, 主、被动区桩侧水土压力均增大, 桩向坑内变形。由此可得, 坑外积水荷载导致基坑的支护结构变形增大, 坑内积水荷载会减弱坑外积水荷载对支护结构变形的影响。

(4) 地下水位上升影响分析

工况1: 主动区地下水位上升50 cm (根据现场地下水水位监测); 工况2: 坑内地下水位上升1 m至坑内地表; 工况3: 主动区地下水位上升50 cm, 同时坑内地下水位上升1 m。计算得到不同工况坑内外桩侧总孔压分布, 如图11所示, 坑内外地下水位上升, 主、被动区总孔隙水压力几乎没有变化, 桩身受力、变形影响较小, 桩顶水平位移几乎没有变化。

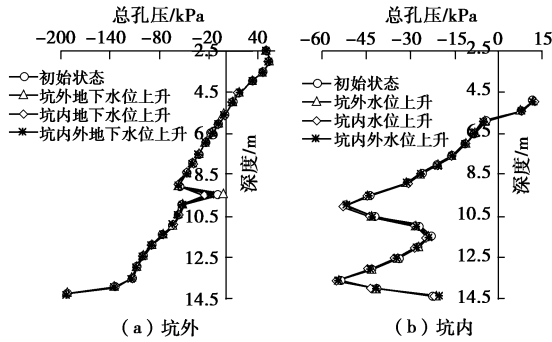


图 11 不同水位上升工况坑内外桩侧总孔压分布

Fig. 11 Pore pressures on pile side inside and outside foundation pit at different water-level rise conditions

(5) 流固耦合影响分析

开挖结束后, 基坑达到稳态渗流, 之后, 在基坑的表面施加水流量边界条件: 强度为 0.083 m/d, 时长为 3 d, 基坑发生瞬态渗流。据图 12 可知, 流固耦合作用后, 坑外桩侧总孔压在坑底以上减小, 桩底处桩侧的总孔压减小; 坑内桩侧孔压在接近桩底时增加, 坑内外的总孔压差值增大, 桩向坑内发生变形。桩顶水平位移由 32.9 mm 增至降雨后的 40 mm, 增量为 7 mm, 增加 20%。

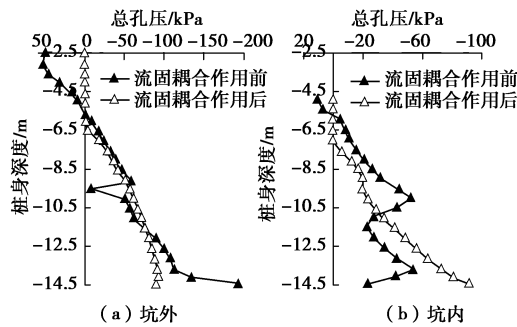


图 12 流固耦合作用前后坑内外桩侧总孔压分布

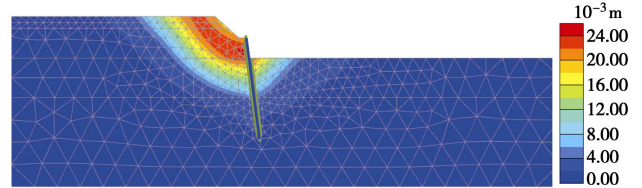
Fig. 12 Pore pressures on side of pile before and after fluid-solid coupling

根据以上 5 个方面的分析, 降雨对基坑支护结构变形影响主要的因素: ①坑外杂填土重度增加 (或存在积水荷载); ②坑内地下水位以上非饱和和土体软化; ③降雨条件下基坑发生瞬态渗流。

3.3 数值模拟与工程实测对比

(1) 固结、蠕变对基坑支护结构变形的影响

基坑开挖至坑底, 桩顶水平位移为 32.9 mm, 土体变形云图如图 13 所示。基坑在开挖结束后坑内存在超孔隙水压力, 固结过程中逐渐消散, 同时坑底土体为淤泥质黏土, 蠕变作用较明显^[15]。开挖结束后基坑受蠕变和固结作用, 桩顶水平位移及增量随固结、蠕变时间的变化如图 14 所示。



总位移
最大值为 0.02467 m (单元 483 在节点 1961)

图 13 基坑开挖至坑底时土体变形云图

Fig. 13 Cloud diagram of soil deformation under excavation of foundation pit to its bottom

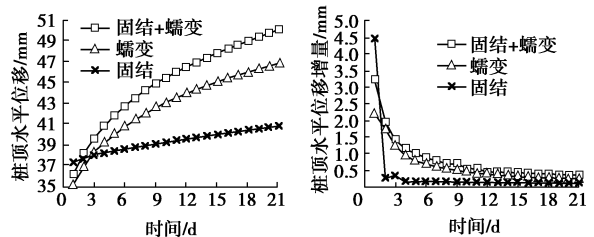


图 14 随固结及蠕变时间变化的桩顶位移

Fig. 14 Variation of displacement of pile top with consolidation and creep

据图 14 可知: 基坑在固结、蠕变 3 d 时, 桩顶水平位移增加 6.66 mm, 在固结、蠕变 6 d 时, 桩顶水平位移增加 9.75 mm。前 6 d 未降雨, 固结和蠕变对基坑的作用使支护结构变形增大; 随时长增加, 蠕变和固结作用产生的桩顶水平位移增量减小。

(2) 降雨对基坑支护结构变形的影响

根据降雨对基坑的实际影响, 设定计算条件: ①坑外杂填土重度增加, 以均布积水荷载 2.5 kN/m 的形式施加在坑外侧; ②坑内土体软化, 取值参数按照表 7 选取; ③降雨边界条件下, 基坑瞬态渗流。数值模拟计算降雨影响前后桩身内力、侧移得到如图 15 所示结果, 桩顶水平位移在 7 月 12 日—15 日期间增加 6.5 mm, 7 月 15 日—18 日期间增加 3 mm, 7 月 18 日—22 日期间增加 14 mm。

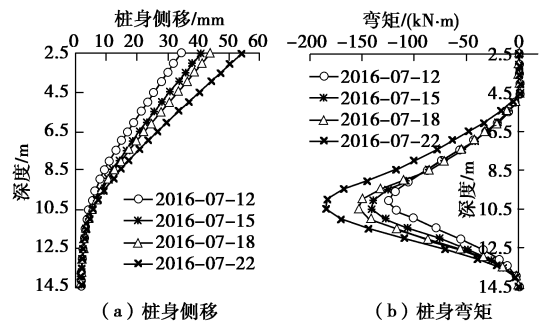


图 15 不同时间桩身侧移及弯矩

Fig. 15 Lateral movements and bending moments of pile at different time

(3) 数值模拟与实测结果对比

将数值模拟的桩顶水平位移结果与工程实测对比, 图 16 可以直观看出实测值与模拟值的关系。

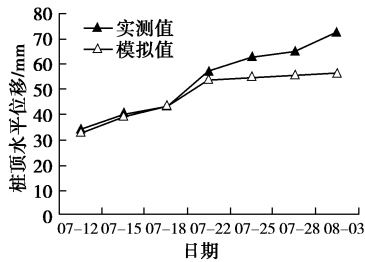


图 16 工程实测与数值模拟桩顶水平位移对比

Fig. 16 Comparison between measured and simulated horizontal displacements of pile top

第一次降雨时, 桩顶水平位移实测值与模拟数值接近, 误差在 5% 内, 而二次降雨后, 实测与模拟差值变大, 这是由于两次降雨存在 3 d 的时间间隔, 坑内水被排走, 土体表面水分蒸发, 土体强度逐渐回升, 第二次降雨时, 坑内外土体强度再次降低, 坑外杂填土重度重新增加。但由于数值模拟无法完成该自然现象的模拟, 故只对基坑开挖结束后第一次降雨进行了模拟验证, 验证结果良好, 说明对坑内淤泥质黏土饱和度的假定和数值模拟计算条件、计算方法可靠。

4 降雨及基坑各影响因素分析

为考虑降雨对基坑的影响, 在基坑开挖结束后即降雨, 不考虑固结、蠕变的影响, 假定坑内没有积水, 降雨量 300 mm 内的雨水在坑外可全部入渗到杂填土层。按照此假定进行如下计算: ①降雨量在坑外以均布荷载的形式施加在坑外杂填土层上; ②坑内无积水, 在坑内不施加外荷载; ③坑内土体降雨后雨水入渗, 入渗深度范围内土体发生软化, 强度降低, 参照表 4 进行取值; ④施加降雨边界条件, 基坑瞬态渗流。

4.1 不同降雨因素影响分析

以悬臂支护为例研究降雨强度、降雨时长、降雨量对基坑支护结构变形的影响, 设计基坑开挖结束时的桩顶水平位移为 4 cm。

(1) 降雨强度

控制降雨时长为 24 h, 计算中雨、大雨、暴雨、大暴雨 4 种工况, 坑内土体软化深度分别为 20, 40, 70, 70 cm, 坑外均布积水荷载分别为 0.3, 0.6, 1.44, 2.4 kN/m, 整理结果得到降雨前后的桩身侧移、弯矩如图 17 所示。降雨 24 h, 随降雨强度增加, 桩顶水平位移增量由中雨的 6 mm 增至大雨的 10 mm、暴雨的 17 mm、大暴雨的 21 mm, 桩身弯矩、支护结构变形增量随着降雨强度的增大而显著增大。

(2) 降雨时长

控制降雨强度为 2.5 mm/h (大雨), 计算 12, 24, 48, 72 h 4 种降雨时长, 坑内土体软化深度分别为 20, 40, 80, 100 cm, 坑外均布积水荷载分别为 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 kN/m, 整理降雨前后桩顶水平位移和桩身最

大弯矩值如表 9 所示。

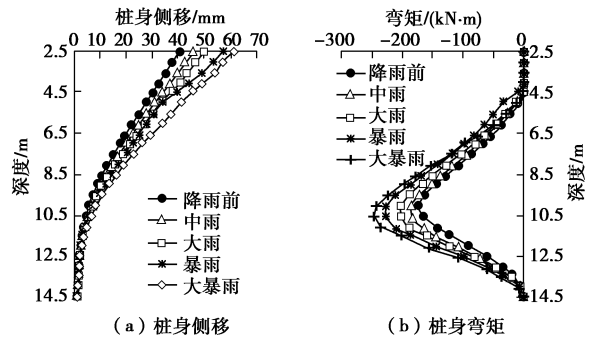


图 17 降雨 24 h 不同降雨强度桩身侧移及弯矩

Fig. 17 Lateral displacements and bending moments of pile under different rainfall intensities at rainfall duration of 24 h

表 9 不同降雨时长导致桩身位移及内力变化

Table 9 Variation of pile displacement and internal force during heavy rainfall intensity with different rainfall durations

降雨时长/h	桩顶水平位移			桩身最大弯矩		
	降雨前/mm	增量/mm	增幅/%	降雨前/(kN·m)	增量/(kN·m)	增幅/%
0	40.48	0	0	173.4	0	0
12	45.47	5.00	12	186.8	13.4	8
24	49.79	9.31	23	203.0	29.6	16
48	56.64	16.16	40	229.4	56.0	28
72	62.88	22.40	55	254.0	80.6	35

大雨强度下, 桩顶水平位移增幅在 12 h 时为 12%, 24 h 为 23%, 48 h 为 40%, 72 h 为 55%, 降雨强度一定时, 随降雨时长增加, 桩顶水平位移接近线性增加。

(3) 降雨量

针对 50, 100, 200, 300 mm 4 种降雨量, 研究降雨量以及降雨量一定降雨强度、历时不同的影响, 计算方案如表 10 所示。

表 10 不同降雨量及降雨强度计算条件

Table 10 Calculation conditions for different rainfall amounts and intensities

降雨量/mm	降雨类型	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨时长/h	坑内土体软化深度/cm	坑外均布荷载/(kN·m ⁻¹)
50	小雨	1.25	40	30	0.5
	大雨	2.50	20	30	
	暴雨	6.00	8.3	25	
	大暴雨	10.00	5	15	
100	小雨	1.25	80	65	1.0
	大雨	2.50	40	65	
	暴雨	6.00	16.7	50	
	大暴雨	10.00	10	30	
200	小雨	1.25	160	100	2.0
	大雨	2.50	80	100	
	暴雨	6.00	33.3	100	
	大暴雨	10.00	20	60	
300	小雨	1.25	240	100	3.0
	大雨	2.50	120	100	
	暴雨	6.00	50	100	
	大暴雨	10.00	30	90	

图 18 给出了计算得到的桩顶水平位移、水平位移增量。降雨量为 50 mm 时, 桩顶水平位移增量为 4 mm, 增加 10%, 降雨量为 300 mm 时, 桩顶水平位移增量为 28 mm, 增加 70%, 随降雨量增加, 基坑支护结构的变形增大; 降雨量一定, 长历时低强度比短历时高强度的降雨对基坑支护结构的变形影响略大。

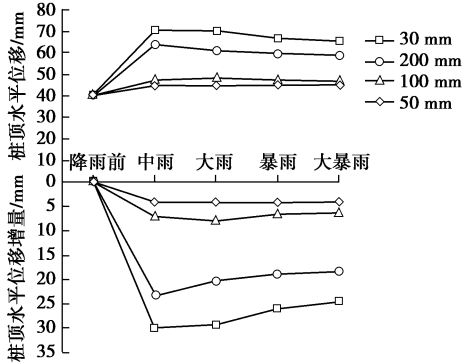


图 18 不同降雨量及降雨强度桩顶水平位移及增量

Fig. 18 Lateral displacements of pile under different rainfall amounts and intensities

4.2 基坑参数因素

根据前述结论, 降雨对基坑的影响主要与降雨量相关, 为进一步研究基坑参数对降雨的敏感程度, 针对不同基坑开挖深度、不同支护结构的初始设计位移、不同支护形式的基坑, 分析支护结构变形对降雨的敏感程度, 降雨计算方案采用降雨 3 d 247mm, 坑内软化深度 1 m, 坑外积水荷载 2.5 kN/m。

(1) 开挖深度

基坑不同开挖深度时, 基坑的支护形式均为围护桩加设一道水平支撑, 控制桩身的最大位移均为 1 cm, 图 19 给出了开挖深度 5, 6, 7, 8 m 基坑降雨前后支护桩的桩身侧移、弯矩, 降雨后桩身最大水平位移增量约为 2.5 mm, 降雨对基坑支护结构变形的影响与开挖深度关系不大。

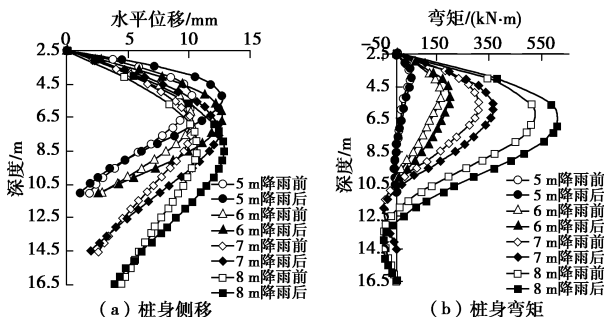


图 19 不同开挖深度降雨前后桩身侧移及弯矩

Fig. 19 Lateral displacements and bending moments of pile under different excavation depths before and after rainfall

(2) 桩顶初始位移

基坑支护结构为悬臂桩, 桩顶初始位移设计为 2, 3, 4, 5 cm, 图 20 (a) 给出了降雨前后初始位移不同的桩身侧移, 整理得到桩顶水平位移增量与初始水

平位移的关系曲线 (图 20 (b))。

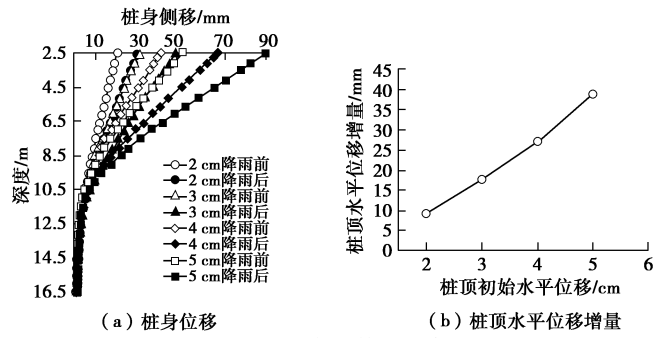


图 20 不同桩顶位移降雨前后桩身侧移及增量

Fig. 20 Lateral displacements of piles under different initial displacements of pile top before and after rainfall

根据图 20 可知: 当桩顶初始位移为 2 cm 时, 桩顶水平位移增量为 9 mm, 增加 45%; 当桩顶初始位移为 5 cm 时, 桩顶水平位移增量为 39 mm, 增加 78%。随着桩顶初始位移增大, 降雨导致的桩顶水平位移的增量和增幅均增加。

5 结 论

结合现场实测和室内试验, 基于饱和-非饱和渗流理论, 利用 Plaxis2D 有限元分析软件, 分析了降雨对基坑支护结构变形的影响, 进一步认识了降雨对基坑支护结构变形影响的作用机理, 得到如下结论:

(1) 根据室内试验, 土体饱和度越大, 渗透能力越低; 降雨量一定, 低强度长历时比高强度短历时工况土体入渗深度大; 黏聚力和压缩模量对雨水的敏感程度高于内摩擦角。孔隙比为 0.97、饱和度 70% 的黏土在入渗深度内, 黏聚力、压缩模量降低 50%, 内摩擦角降低 30%。

(2) 降雨对软土基坑支护结构变形影响主要因素为坑外杂填土重度增加、坑内土体软化及渗流作用。

(3) 降雨量为支护结构变形的主要影响因素。降雨量 300 mm 内, 降雨强度一定, 随降雨时长增加, 以及降雨时长一定, 随降雨强度增加, 基坑支护结构变形增量呈接近线性增长的趋势; 降雨量一定, 低强度长历时比高强度短历时的降雨工况对基坑支护结构变形的影响略大。

(4) 支护结构初始位移相同时, 开挖深度对相同降雨条件下的支护结构变形增量影响不大。

(5) 支护桩顶初始位移越大, 支护结构受降雨影响越大。相同降雨工况下, 悬臂支护基坑桩顶初始位移为 2 cm 时, 桩顶水平位移增加 45%, 当桩顶初始位移为 5 cm 时, 增幅为 78%。

参考文献:

[1] 张华庆, 谭佳佳, 左殿军. 降雨入渗对软土岸坡稳定性影

- 响研究[J]. 水运工程, 2014(4): 148 - 153. (ZHANG Hua-qing, TAN Jia-jia, ZUO Dian-jun. Stability study of unsaturated soft soil slopes under rainfall infiltration[J]. Port and Waterway Engineering, 2014(4): 148 - 153. (in Chinese))
- [2] 李振嵩. 降雨条件下非饱和土边坡的稳定性分析[D]. 广州: 中山大学, 2007. (LI Zhen-song. Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Under the Conditions of Rainfall[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2007. (in Chinese))
- [3] 孔郁斐, 周梦佳, 宋二祥, 等. 利用 PLAXIS 软件计算考虑降雨的边坡稳定性[J]. 水利水电工程学报, 2014(3): 70 - 76. (KONG Yu-wen, ZHOU Meng-jia, KONG Er-xiang, et al, Calculation of the slope using Plaxis software under the conditions of rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(3): 70 - 76. (in Chinese))
- [4] 刘子振. 持续降雨入渗非饱和黏土边坡失稳机理及其应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. (LIU Zi-zhen. Instability Mechanism and Application Analysis of Partially Saturated Clay Slope Under Sustained Rainfall Infiltration[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese))
- [5] 石振明, 沈丹祎, 彭 铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 977 - 985. (SHI Zhen-ming, SHEN Dan-yi, PENG Ming, et al. Slope stability analysis by considering rainfall infiltration in multi-layered unsaturated soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8): 977 - 985. (in Chinese))
- [6] 王玉军. 降雨入渗对黏土边坡的影响分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2016. (WANG Yu-jun. Stability Analysis of Clay Slope Under Rainfall Infiltration[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. (in Chinese))
- [7] 徐 全, 谭晓慧, 沈梦芬. 降雨入渗条件下土质边坡的稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 254 - 259. (XU Quan, TAN Xiao-hui, SHEN Meng-fen. Stability analysis of soil slopes under rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 254 - 259. (in Chinese))
- [8] 彭立新. 降雨入渗对地铁基坑边坡变形影响分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. (PENG Li-xin. Analysis of Rainfall Infiltration on Deformation of Subway Excavation Slope[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [9] 李炎隆, 陈 波, 马成成, 等. 基于 ABAQUS 的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1): 155 - 161. (LI Yan-long, CHEN Bo, MA Cheng-cheng, et al. Analysis of excavation slope under rainfall infiltration basing on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(1): 155 - 161. (in Chinese))
- [10] 邱海兵. 降雨入渗对非饱和土基坑围护结构稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. (QIU Hai-bing. Study of rain infiltration on stability of unsaturated pit supporting structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese))
- [11] 崔凤展. 强降雨作用下土质深基坑稳定性及其控制技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016. (CUI Feng-zhan. Study on the Stability and Controlling Technology of Soil Deep Foundation Pit under Strong Rainfall[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2016. (in Chinese))
- [12] 周根郊. 成都膨胀土基坑边坡降雨条件与支护结构内力关系的数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (ZHOU Gen-tan. The Numerical Emulation Study on the Relationship between the Rainfall Conditions and the Internal Force of Retaining Structure of Expansive Soil Foundation Pit in Chengdu[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [13] MORGENSTERN N R, PRICE V. The analysis of the stability general slip surface[J]. Géotechnique, 1965, 15(1): 79 - 93.
- [14] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 降雨条件下一维土柱垂直入渗模型试验研究及其渗透系数求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 475 - 484. (QIN Xiao-hua, LIU Dong-sheng, SONG Qiang-hui, et al. Experimental study on one-dimensional vertical infiltration in soil column under rainfall and the derivation of permeability coefficient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 475 - 484. (in Chinese))
- [15] 陈文苏. 软土蠕变沉降的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2004. (CHEN Wen-su. Numerical Simulation of Creep Settlement of Soft Soil[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [16] FREDLUND D G. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnique Journal, 1979, 16: 121 - 129.
- [17] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, 3(49): 387 - 403.