



以建筑垃圾为填料的湿润气候区毛细阻滞型覆盖层综合性能评价

王锦楠, 徐 辉

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 利用建筑垃圾构筑毛细阻滞型覆盖层有利于解决建筑垃圾出路难题和覆盖层土料来源问题;对湿润气候区的毛细阻滞型覆盖层性能进行综合评价,有利于规范湿润区毛细阻滞型覆盖层的应用,因此具有重要的理论研究和实践应用价值。建立了以持水性、防渗性和抗滑性为指标的毛细阻滞型覆盖层综合性能评价体系,即当存储量(包括蒸发量)大于降雨入渗量的 61.00%,渗漏比小于 30.00 mm/当地年降雨入渗量,抗滑稳定安全系数大于 1.35 时,覆盖层综合性能良好。构建了以再生细骨料为持水层和营养植被层填料、再生粗骨料为排水层填料、固化泥饼为防渗层填料的毛细阻滞型覆盖层模型,通过 Geo-studio 软件分析了该毛细阻滞型覆盖层的持水能力、防渗性能、抗滑稳定性。结果表明:持水层存储量随持水层厚度增加而逐渐增大,防渗层渗漏量随持水层厚度增加和坡度变陡而逐渐减小,边坡稳定安全系数随坡度变陡和雨强增大而逐渐减小。因此,利用上述土料填筑的毛细阻滞型土质覆盖层应用于湿润气候区是可行的,建议持水层厚度不小于 0.90 m,坡度不大于 1:2。

关键词: 毛细阻滞型土质覆盖层;湿润气候区;建筑垃圾;持水能力;防渗能力;抗滑稳定性

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)01-0136-13

Study on the comprehensive performance evaluation of the capillary barrier soil cover system in humid climate zone built with construction wastes

WANG Jinan, XU Hui

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Using the construction wastes to construct the capillary barrier soil cover system (CBSCS) is helpful to solve the problems of the outlet of construction wastes and the source of cover system soils, and evaluating the comprehensive performance of CBSCS in humid climate zone is helpful to standardize the application of CBSCS in humid climate zone. Hence, this paper has great theoretical research and practical application value. In this paper, an evaluation system for the comprehensive performance of the capillary barrier cover system was established, in which the indicators of water-holding capacity, anti-seepage capacity and anti-sliding capacity were considered. The cover system had better comprehensive properties under the following conditions: the storage amount (including evaporation) was larger than 61.00% of rainfall infiltration; the leakage ratio was less than 30.00 mm/local annual rainfall infiltration; the anti-slide safety coefficient was greater than 1.35. The model of the capillary barrier cover system was constructed, in which the recycled fine aggregate was used as the filler in water-holding layer and nutritive vegetation layer; the recycled coarse aggregate was used as the filler in drainage layer and solidification mud cake was used as the filler in anti-seepage layer. The water-holding capacity, anti-seepage capacity and

收稿日期: 2020-09-03 网络出版日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708508); 浙江省重点研发计划项目(2019C03107)

作者简介: 王锦楠(1996-), 女, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究

通信作者: 徐 辉, E-mail: xuhui@zstu.edu.cn

anti-sliding capacity of the capillary barrier cover system were analyzed by the software Geo-studio. The findings showed that, the storage amount of water-holding layer increased gradually with the increase of the thickness of water-holding layer; the leakage of anti-seepage layer decreased gradually with the increase of thickness of water-holding layer and the increase of slope; the safety factor of slope stability decreased gradually with the increase of slope and the increase of rainfall intensity. It is feasible to apply the above-mentioned capillary barrier cover system in humid climate zone, and it is recommended that the thickness of water-holding layer should be no lower than 0.90 m and the slope should be no more than 1:2.

Key words: capillary barrier soil cover system; humid climate zone; construction wastes; water-holding capacity; anti-seepage capacity; anti-sliding capacity

0 引言

目前,我国正处于快速城镇化阶段,各城市地下空间大规模开发建设,产生了大量的建筑垃圾。建筑垃圾是指对各类建筑物和构筑物及其辅助设施等进行建设、改造、装修、拆除、铺设等过程中产生的各类固体废弃物,主要包括工程渣土、工程泥浆、工程垃圾、拆除垃圾和装修垃圾五大类^[1-2]。据统计,2017 年我国共计产生建筑垃圾达到 23.8 亿吨,预计 2030 年建筑垃圾将达到 73 亿吨,约占城市垃圾总量的 40%~50%^[3-4]。然而,我国建筑垃圾资源化利用仍处于初级阶段,2017 年 23.8 亿吨中仅有 1.19 亿吨进行了资源化利用,利用率不足 10%,而欧美国家达到 90%,日韩国家则达到 95%^[5-7]。我国大量渣土和废弃泥被运往城市周边洼地或废弃矿坑进行简易填埋,这种粗放式处置方式不仅占用大量土地,而且易造成安全隐患和环境污染。例如,2015 年 12 月 20 日,深圳光明新区红坳渣土受纳场发生滑坡,约 270 万立方米的建筑渣土发生失稳滑动,掩埋及破坏 33 栋建筑,造成了 77 人死亡,直接经济损失 8.81 亿元^[8]。因此,对建筑垃圾进行资源化利用是推进城市安全发展和污染防治的迫切需求。

与此同时,我国众多建于 20 世纪 90 年代的卫生填埋场(如深圳下坪、杭州天子岭、上海老港等)容量接近饱和,因难以找到合适的新填埋场址,正面临前期填埋的陈腐垃圾进行开挖增容以延长其使用年限、后期填埋场进行封场覆盖和生态修复的需求。例如上海老港填埋场前三期填埋高度小,增容潜力大,第四期正面临封场覆盖修复。填埋场封场修复对实现垃圾无害化处理、减少渗沥液产量、维护填埋堆体稳定、保护周边环境等具有重要意义^[9-11]。《生活垃圾卫生填埋场封场技术规范》(GB 51220—2017)规定:填埋场封场必须建立完整的封场覆盖系统,其结构自顶向下依次为绿化土层(营养植被层和

覆盖支持土层)、排水层、防渗层和排气层。其中,绿化土层主要功能是植物生长、雨水导流、防风刮水冲、防失稳破坏等,厚度不宜小于 500 mm。若单个卫生填埋场封场覆盖面积按 100 公顷估算,需绿化土层土料 50 多万方,可见封场覆盖层的土料需求量很大。若能将建筑垃圾用作填埋场封场覆盖层材料,将同时解决建筑垃圾出路难题和覆盖层土料来源问题,并产生显著的经济、社会和环境效益。

毛细阻滞型覆盖层主要是由上层细粒土和下层粗粒土(例如粉土和碎石、再生细骨料和再生粗骨料)构成,因细粒土和粗粒土导水性能的差异使得两者界面处产生一种毛细阻滞作用。毛细阻滞型覆盖层的水分运移模型如图 1 所示,水分运移过程具体表现为:降雨时,一部分水量以地表径流形式进入地表水收集和导排沟,另一部分水量进入覆盖层并存储在细粒土层中;当水分运移到细粒土与粗粒土界面时,由于毛细阻滞作用水分被阻滞进入到粗粒土层,从而导致细粒土层存储水量增加;当水量超过细粒土层的最大存储量时,水分进入粗粒土层,并通过侧向导流排出覆盖层,微量水分穿透防渗层;非降雨时段,通过地表蒸发作用将存储于细粒土层中的水分向大气层中释放,为下次降雨腾空库容^[12-14]。因此,在细粒土层存储水分以及粗粒土层导排水分的共同作用下,能够有效减少进入到堆体中的雨水入渗量,同时能够为植被生长提供必要的水分^[15-16]。Chen^[17]、Benson 等^[18]根据非饱和土的水分储存-释放原理提出了一种土质覆盖层水量分析及设计厚度计算的方法。焦卫国等^[9,14,19-20]分析了西安地区半干旱气候下黄土-砂土毛细阻滞型覆盖层的储水能力,验证了毛细阻滞作用,并提出了毛细阻滞覆盖层的初始厚度设计方法。邱清文^[15]系统研究了黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层的水气耦合运移规律,并评估了该覆盖层在西北半干旱气候条件下的填埋气减排性能,提出了覆盖层防渗和填埋气减排性能的简

化评估方法。赵士旺^[16]采用数值模拟方法研究了毛细阻滞型覆盖层在干湿循环条件下的水量平衡规律,发现在覆盖层的设计过程中,持水层厚度对渗漏量影响较大,坡度次之,排水层厚度影响较小。邓林恒^[21]提出了以粉土、砂和碎石分别作为细粒土层、非饱和导排层和粗粒土层填料的新型毛细阻滞型覆盖层结构型式,通过控制上层土的降雨入渗量以及发挥毛细阻滞与侧向导排作用,可有效控制覆盖层在强降雨条件下的渗漏量。由此可见,毛细阻滞型覆盖层具有良好的防渗和持水性能。

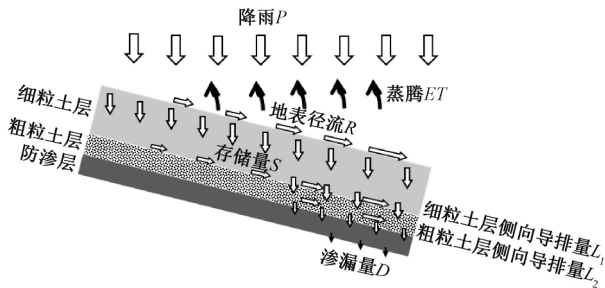


图1 毛细阻滞型覆盖层水分运移模型

目前,国外已有一些学者在利用建筑垃圾构筑毛细阻滞型覆盖层方面开展了一些初步研究,但研究成果较为缺乏。Rahardjo等^[22]利用再生混凝土骨料替代毛细阻滞型覆盖层粗粒材料,在夏季选择了大雨(总雨量130.05 mm,最大降雨强度115.82 mm/h)和小雨(总雨量21.08 mm,最大降雨强度28.96 mm/h)两种降雨工况进行了现场试验,结果表明该覆盖层能有效减少雨水入渗,并确保边坡稳定。Wong等^[23]在香港新界东南填埋场生态修复过程中,将建筑和拆除垃圾的粗料和细料分别用作毛细阻滞型覆盖层的粗粒层和细粒层填料,并在细粒层中掺入土壤和有机物质,实现了水土保持和植物生长。Ng等^[24]通过试验表明在极端降雨条件下,由建筑垃圾骨料构筑而成的毛细阻滞型土质覆盖系统是一种理想覆盖层,可以有效防止雨水下渗而进入垃圾体。Kalonji Kabambi等^[25]由试验和数值预测证实了在极端降雨条件下,废石材料具有作为毛细阻滞型覆盖层天然土壤替代品的潜力。Mbonimpa等^[26]将矿山产生的污泥与天然粉土的混合物作为毛细阻滞型覆盖层持水层材料,发现毛细阻滞型覆盖层仍有较好的保水性能。上述研究表明,利用建筑垃圾构筑的毛细阻滞型覆盖层应用于湿润气候区时具有良好的防渗性能、持水性能和边坡稳定性,但上述研究没有对这三种性能进行综合分析和评价,也没有在此基础上提出覆盖层结构的设计方法。

综上可知,毛细阻滞型覆盖层性能评价内容主要包括防渗性能、持水性能、边坡稳定性等,其影响因素主要有土料性质、土层厚度、边坡坡度、降雨条件等。本文首先以持水性、防渗性和稳定性为评价指标,建立了毛细阻滞型覆盖层综合性能评价体系;然后以再生细骨料、再生粗骨料和固化泥饼分别作为细粒土层、粗粒土层和防渗层材料,利用数值模拟方法分析了降雨强度、土层厚度和坡度对该类型覆盖层持水性、防渗性和稳定性的影响规律;最后根据数值模拟结果和覆盖层综合性能评价体系,对利用建筑垃圾构筑的毛细阻滞型覆盖层的结构型式设计提出了相应的工程建议。

1 材料与方法

1.1 覆盖层模型及填料性质

《生活垃圾卫生填埋场封场技术规范》(GB 51220—2017)规定:绿化土层应由营养植被层和覆盖支持土层组成。覆盖支持土层主要作用为持有水分、防失稳破坏,本文将其改为持水层。因此,毛细阻滞型覆盖层从下到上依次为防渗层、排水层、持水层和营养植被层,其模型示意图如图2所示。采用建筑垃圾替代传统土料,构建了生态型毛细阻滞型覆盖层。持水层和营养植被层均由再生细骨料构成,排水层由再生粗骨料构成,防渗层由固化泥饼构成。利用建筑垃圾中的混凝土、砖瓦、石材等经除土、破碎和筛分等工艺制成的骨料称为再生骨料;其中粒径在2.00~4.75 mm范围内的颗粒称为再生细骨料,粒径大于4.75 mm的颗粒称为再生粗骨料。固化泥饼是指在废弃泥中添加加固材料如水泥、石灰等,使其转换为不可流动的泥饼。三种建筑垃圾的颗粒级配曲线、土水特征曲线、非饱和渗透系数曲线^[24,27-28]如图3所示,含水量、干密度、内摩擦角、黏聚力等其它物理力学性质^[24,27-28]如表1所示。再生粗骨料、再生细骨料和固化泥饼的平均粒径 d_{50} 分别为12.48, 1.24 mm和0.01 mm,不均匀系数 C_u 分别为1.65, 9.63和15.38,曲率系数 C_c 分别为0.98, 1.04和1.88。再生粗骨料、再生细骨料和固化泥饼的饱和体积含水量分别为0.455, 0.386和0.498,进气值分别为0.23, 3.72 kPa和24.45 kPa,残余体积含水量分别为0.085, 0.075和0.300。再生粗骨料、再生细骨料和固化泥饼的饱和渗透系数分别为270, 0.3507 m/h和0.00036 m/h,其中再生粗骨料的液相渗透系数随着基质吸力的增大下降最快。

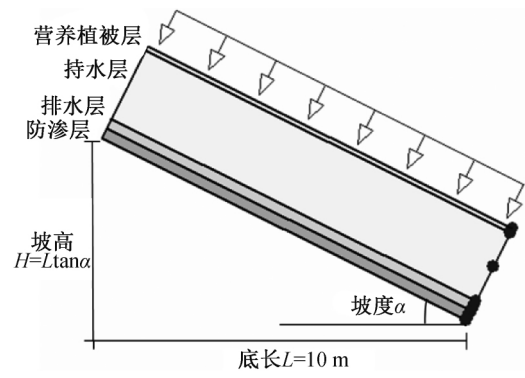
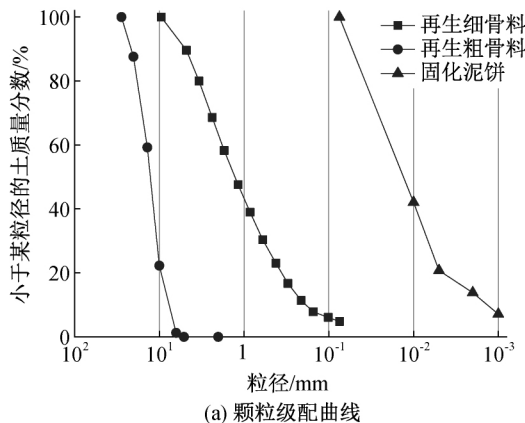
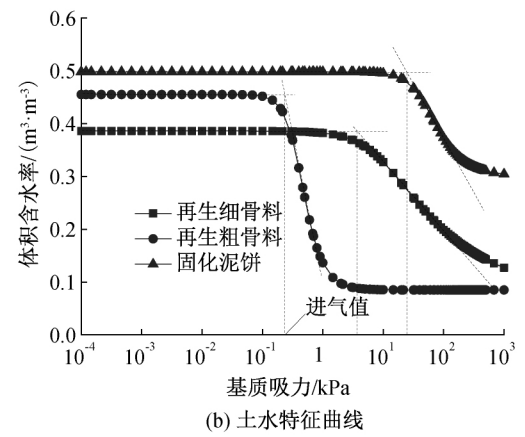


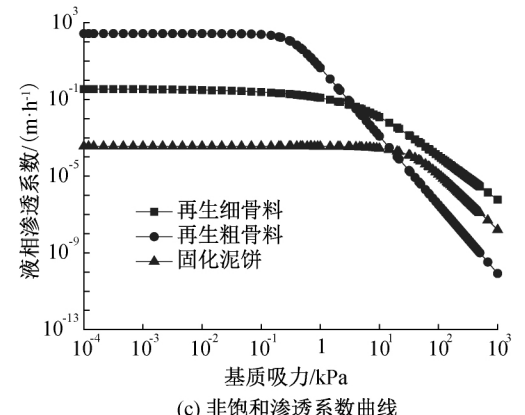
图 2 毛细阻滞型覆盖层模型示意



(a) 颗粒级配曲线



(b) 土水特征曲线



(c) 非饱和和渗透系数曲线

图 3 建筑垃圾颗粒级配曲线和水力特性曲线

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 建筑垃圾基本物理性质

| 土层 | 饱和体积 含水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 饱和渗 透系数/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$) | 残余体积 含水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 内摩 擦角/ ($^{\circ}$) | 黏聚 力/ kPa |
|-----------|--|---|--|---|-----------------------------|-----------------|
| 再生细 骨料 | 0.3860 | 0.35070 | 0.0750 | 1.592 | 25 | 7 |
| 再生粗 骨料 | 0.4550 | 270.000 | 0.0850 | 1.512 | 40 | 0 |
| 固化 泥饼 | 0.4980 | 0.00036 | 0.3000 | 1.450 | 7 | 35 |

1.2 边界条件

覆盖层渗流和稳定分析分别采用 Geo-Studio 中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块。渗流分析边界条件设置如下：当降雨强度大于入渗率时，营养植被层坡顶面设置水头边界；当降雨强度小于入渗率时，营养植被层坡顶面设置单位流量边界，模拟降雨条件；坡脚处设置孔隙水压力为 0 的边界，用于分析覆盖层的侧向导排量。稳定分析时，将 SEEP/W 中分析得到的孔隙水压力分布值作为稳定分析的初始孔隙水压力。杭州市属于典型湿润气候区，本文以该城市的降雨条件作为研究背景。根据中国气象数据网统计结果^[29]，得到 1981 年至 2010 年间杭州市月均降雨量如图 4 所示，其中月最大降雨量为 432.60 mm，暴雨期间的降水量为 300.00 ~ 500.00 mm，降雨时长约 4~7 h。据此，确定三种降雨工况用于数值模拟：a) 暴雨工况，降雨强度为 62.00 mm/h，降雨时长为 7 h，总降雨量 434.00 mm；b) 连续长时间降雨工况，降雨强度为 0.60 mm/h，降雨时长为 30 d，总降雨量 432.00 mm；c) 正常降雨工况，采用图 4 所示的月均降雨量，降雨时长为一年，总降雨量 1438.00 mm。

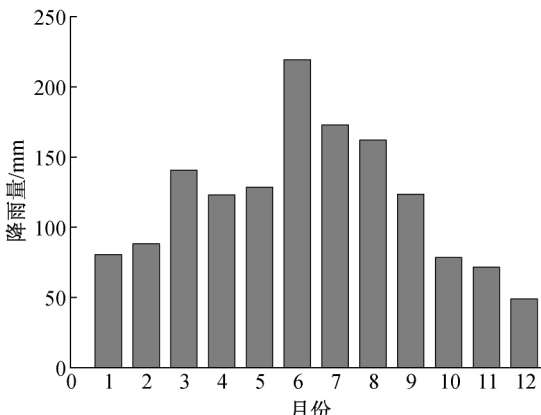


图 4 杭州市月均降雨量

1.3 初始条件

《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》(CJJ112—2007)规定:排水层应采用粗粒或土工排水材料,粗粒材料厚度不应小于 0.30 m;防渗层可由土工膜和压实黏土或土工聚合黏土衬垫组成复合防渗层,也可单独使用压实黏土层,复合防渗层的压实黏土层厚度应为 0.20~0.30 m,单独使用压实黏性土作为防渗层,厚度应大于 0.30 m;营养植被层的土质材料应利于植被生长,厚度应大于 0.15 m。因此,本文确定排水层和防渗层初始厚度均为 0.30 m,营养植被层初始厚度为 0.15 m。持水层初始厚度根据焦卫国等^[9, 19]、詹良通等^[30]提出的理论公式进行计算,它考虑了 4 种极端气候条件和土体的 2 个储水能力指标。计算公式如下:

$$\begin{aligned} L_{ftw} &= F_f \frac{P_{tw}}{2S_c/L}, L_{cts} = F_c \frac{P_{ts}}{2S_a/L}, \\ L_{cos} &= F_c \frac{P_{os}}{2S_a/L}, S_c = \theta_c L; \\ L_{fts} &= F_f \frac{P_{ts}}{2S_c/L}, L_{ctw} = F_c \frac{P_{tw}}{2S_a/L}, \\ L_{cow} &= F_c \frac{P_{ow}}{2S_a/L}, S_a = (\theta_c - \theta_m)L. \end{aligned}$$

其中: L_{ftw} 和 L_{fts} 分别为根据总储水量、年降水量和年降雪量得到的持水层厚度,m; L_{ctw} 和 L_{cts} 为根据有效储水量、年降水量和年降雪量值得到的持水层厚度,m; L_{cow} 和 L_{cos} 为根据有效储水量、冬季植被非生长期降水量和降雪量得到的持水层厚度,m; P_{tw} 为工程所在地年降水量最大值,mm; P_{ts} 为工程所在地年降雪量最大值,mm; P_{ow} 为冬季植被非生长期降水量最大值,mm; P_{os} 为冬季植被非生长期降雪量最大值,mm; S_c 为持水层最大储水能力; S_a 为持水层有效储水能力; L 为持水层厚度,m; θ_c 为持水层底部基质吸力达到排水层进水值时持水率; θ_m 为持水层土体枯萎点对应持水率; F_c 和 F_f 为经验参数。根据中国气象数据网,得到杭州降雨量/降雪量取值如表 2 所示。

表 2 杭州市降雨量/降雪量取值

| 参数 | P_{tw} | P_{ts} | P_{ow} | P_{os} |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| 降雨量或降雪量/mm | 1600 | 17 | 290 | 17 |

根据上述计算方法,

$$\begin{aligned} L_0 &= \max\{L_{ftw}, L_{fts}, L_{ctw}, L_{cow}, L_{cts}, L_{cos}\} = \\ &= \max\{2.13, 0.025, 1.97, 1.13, 0.02, 0.07\} = 2.13, \end{aligned}$$

即得到持水层的初始厚度 L_0 为 2.13 m。

综上所述,本文设计了以下 84 组数值模拟算例:a)排水层和防渗层的初始厚度均取值 0.30 m,持水层厚度共 7 种,即 2.10, 1.80, 1.50, 1.20,

0.90, 0.60 m 和 0.30 m;b)边坡坡度共 4 种,即 1:1, 1:2, 1:3 和 1:4;c)降雨工况共 3 种,即暴雨、连续长时间降雨和正常降雨。

1.4 毛细阻滞型覆盖层综合性能评价体系

覆盖层的持水性能可以用持水层存储量占降雨入渗量的比例来评价。本文总结了文献中关于毛细阻滞型土质覆盖层存储量(考虑蒸发量,下同)/入渗量的数据,如图 5 所示。邓林恒^[21]认为当存储量/入渗量大于 78.9%时,覆盖层能有效存储与释放水分。焦卫国^[9]认为当存储量/入渗量大于 64.2%时,黄土-碎石毛细阻滞覆盖层储水能力良好。根据 Benson 等^[18]和 Albright 等^[31]报道,美国湿润气候区内在役毛细阻滞型覆盖层的存储量占入渗量的平均比例为 61.00%,该持水量基本满足表层植被生长所需。综上所述,为了满足营养植被层所需水分,本文设定毛细阻滞覆盖层存储量/入渗量应大于 61.00%。

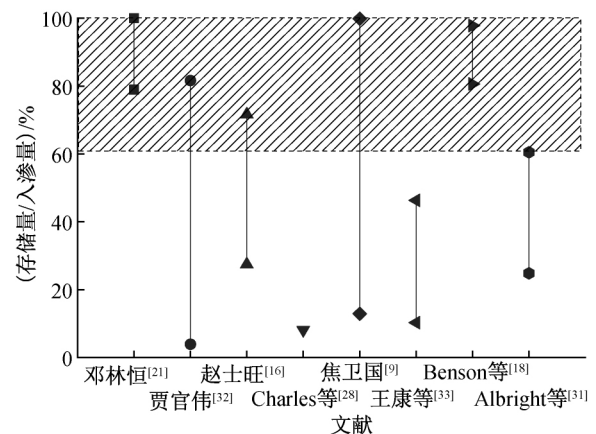


图 5 不同文献确定的存储量/降雨入渗量值

覆盖层的防渗性能可以用防渗层渗漏量占降雨入渗量的比例来评价。本文总结了文献中关于毛细阻滞型土质覆盖层渗漏量/入渗量的数据,如图 6 所示。邓林恒^[21]和贾官伟^[32]研究了毛细阻滞型覆盖层应用于湿润气候区的性能表现,分别认为当渗漏量/入渗量小于 0.31%和 3.56%时,覆盖层防渗性能理想。Ng 等^[28]模拟了强降雨条件下毛细阻滞型覆盖层的防渗性能,认为渗漏量接近于 0 时覆盖层防渗性能优良。Benson 等^[18]在 ACAP 项目中认为,湿润气候区年渗漏量应小于 30.00 mm。然而,该指标是覆盖层在正常一年降雨情况下透过防水层的水量,适用于正常降雨工况,却不适用于短时暴雨工况(7 h)和长时间降雨工况(30 d)。因此本文提出渗漏比(渗漏量/入渗量)小于 30.00 mm/当地年入渗量作为防渗指标。当覆盖层渗漏比小于防渗指标时,说明覆盖层防渗性能良好。

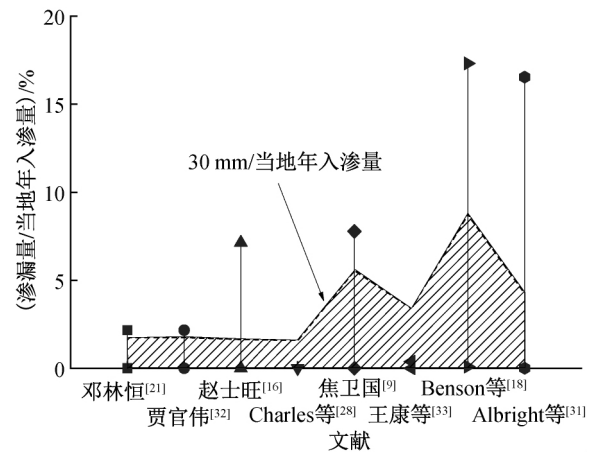


图 6 不同文献确定的渗漏量/当地年降雨入渗量值

覆盖层的抗滑性能可以用边坡稳定安全系数来评价。根据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176—2012)规定:在正常运用条件下,一级边坡的抗滑稳定最小安全系数为 1.35。目前我国很多大型生活垃圾填埋场堆体高度已超过 60 m,即安全等级为一级,因此本文确定其覆盖层边坡的抗滑稳定安全系数应大于 1.35。

基于上述分析,本文以持水层持水性能、防渗层防渗性能和边坡稳定安全性作为评价指标,建立了如表 3 所示的毛细阻滞型覆盖层综合性能评价体系。

表 3 毛细阻滞型覆盖层综合性能评价指标与取值要求

| 性能指标 | 取值要求 |
|------|-------------------------|
| 持水性 | 存储量(包括蒸发量)/入渗量大于 61.00% |
| 防渗性 | 渗漏比小于 30.00 mm/当地年入渗量 |
| 稳定性 | 抗滑稳定安全系数大于 1.35 |

2 结果及分析

2.1 降雨入渗量

覆盖层降雨入渗量模拟结果如图 7 所示。对于暴雨工况和连续长时间降雨工况,两者总降雨量接近,但前者入渗量要远小于后者。在相同降雨条件和覆盖层边坡坡度工况下,随着持水层厚度的增加,降雨入渗量逐渐增大,其增大幅度逐渐趋于平缓。例如,在正常降雨、坡度为 1:2 条件下,当持水层厚度从 0.30 m 增加至 1.50 m 再增加至 1.80 m 时,入渗量从 1346.04 mm 增大至 1363.78 mm 再进一步增大至 1364.53 mm。在相同降雨条件和持水层厚度工况下,入渗量随坡度变陡而减小,但降低值较小,一般小于 5.00 mm。例如,在连续长时间降雨、持水层厚度为 2.10 m 条件下,当坡度为 1:4, 1:3, 1:2 和 1:1 时,降雨入渗量分别为 711.40, 709.51, 708.27 mm 和 706.50 mm。上述结果表明,相比于持水层厚度,坡度对覆盖层降雨入渗量的影响较小。

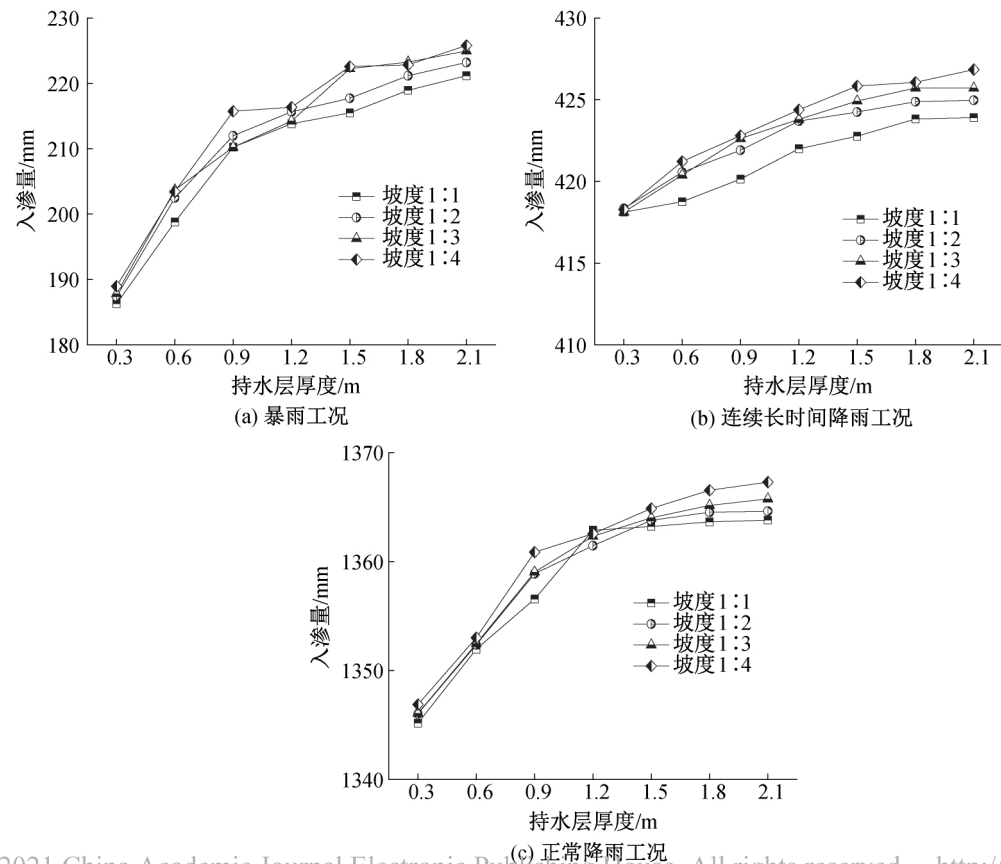


图 7 不同工况下降雨入渗量随持水层厚度变化曲线

覆盖层降雨入渗量与降雨量的比值结果如图8所示。当覆盖层坡度在1:1~1:4、持水层厚度为0.30~2.10 m时,暴雨条件下的入渗量和降雨量的比值(入渗量/降雨量)介于42.00%~52.00%,连续长时间降雨条件下的入渗量/降雨量介于96.00%~99.00%,正常降雨条件下的入渗量/降雨量介于92.00%~95.00%。本文对文献中关于毛细阻滞型土质覆盖层的试验数据进行了总结,如表4所示。在暴雨条件下,本文计算的降雨入渗量与

降雨量的比值结果要高于邓林恒^[21]的试验数据(7.88%~30.54%),但低于Ng等^[28]的试验数据(72.49%)。在连续长时间降雨条件下,本文计算的降雨入渗量与降雨量的比值结果要高于赵士旺^[16]的试验结果(86.63%),接近于焦卫国^[9,14,20]的试验结果(>99.21%)。在正常降雨条件下,本文计算的降雨入渗量与降雨量的比值结果要高于邓林恒^[21](>59.88%)、贾官伟^[32](81.00%~82.20%)等的试验结果。

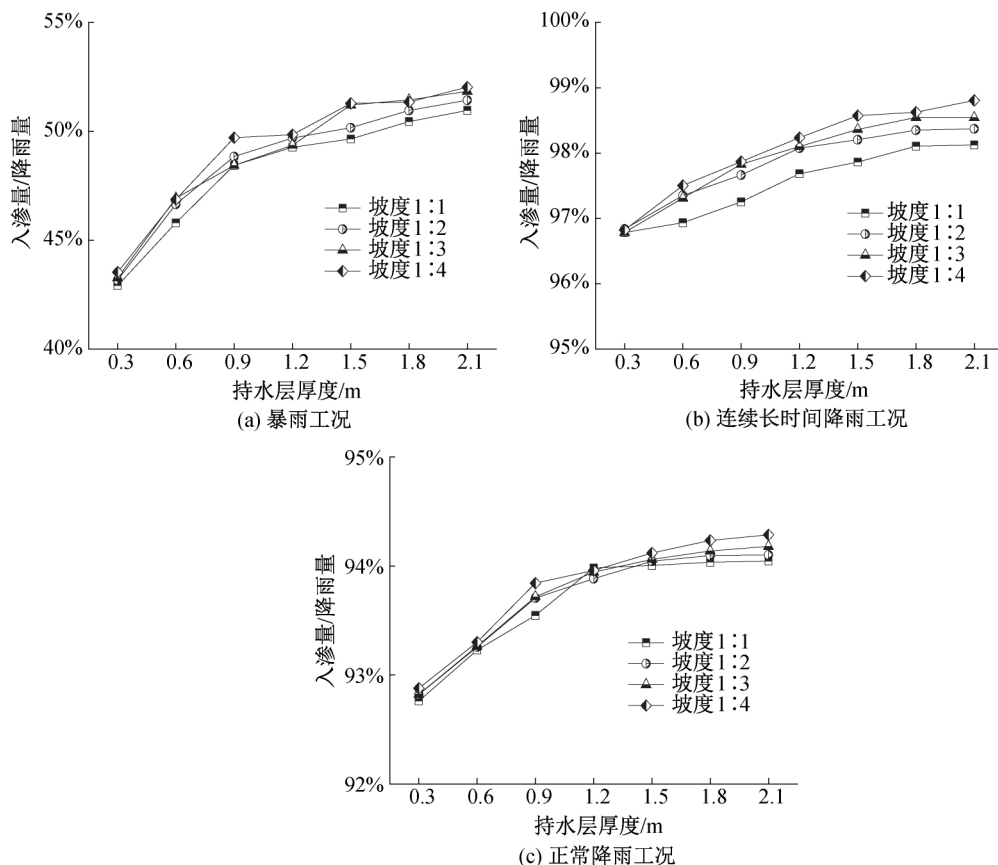


图8 不同工况下入渗量/降雨量随持水层厚度变化曲线

影响毛细阻滞型覆盖层入渗量的主要因素有降雨强度、覆盖层坡度、持水层厚度、持水层土料性质等^[21]。当降雨强度大于土体入渗率时,部分降雨量按入渗率渗入土体,另一部分则形成径流而流走;当降雨强度小于土体入渗率时,降雨量几乎能够全部渗入土体^[34]。因此,暴雨工况下的入渗量/降雨量显著小于连续长时间降雨和正常降雨工况。此外,坡度越大,顺坡面的径流量越大,垂直于坡面的入渗量则越小。降雨入渗前土体处于非饱和状态,降雨入渗主要受基质势和重力势的控制^[35]。在降雨初期,基质势起主导作用,后期重力势发挥更大作用。

入渗开始时,土体湿润范围较小,含水率较低,湿润锋前沿的基质势较高,压力水头和水力梯度较大,湿润锋运移速率也较大,即降雨入渗率较大;之后,随着降雨的进行,雨水逐渐渗入到深层土体中,基质势逐步降低,水头压力也随之降低,因此入渗率越来越小;在入渗后期,湿润锋距离入渗面更远,水从土层顶面运移到湿润锋前沿需要更大的能量,而此时基质势越来越小,重力势开始发挥更重要的作用,水分在重力作用下稳定下渗,进入稳渗期^[35-36]。因此,在其它条件均相同的前提下,持水层土体厚度越大,入渗量就越大。

表 4 毛细阻滞型土质覆盖层试验文献总结

| 数据来源 | | 邓林恒 ^[21] | | Ng 等 ^[28] | | 赵士旺 ^[16] |
|----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|-----------------------|
| | 材料 | 粉土 | 掺入 1.0% 膨润土的粉土 | 掺入 3.2% 膨润土的粉土 | 粉土 | 粉土 |
| 持水层 | 厚度/cm | 20 | 20 | 20 | 40 | 30 |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | 5.30×10^{-6} | 3.20×10^{-6} | 5.30×10^{-7} | $2.00 \times 10^{-5} \sim 5.00 \times 10^{-5}$ | 5.26×10^{-6} |
| 导排层 | 材料 | 砂 | | — | | — |
| | 厚度/cm | 10 | | — | | — |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | 3.84×10^{-4} | | — | | — |
| 排水层 | 材料 | 碎石 | | 砾石砂 | | 砂土 |
| | 厚度/cm | 10 | | 20 | | 30 |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | 2.00×10^{-2} | | $3.00 \times 10^{-2} \sim 5.00 \times 10^{-2}$ | | 3.53×10^{-4} |
| 防渗层 | 材料 | — | | 高岭土 | | — |
| | 厚度/cm | — | | 30 | | — |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | — | | $1.00 \times 10^{-9} \sim 6.00 \times 10^{-9}$ | | — |
| 坡度 | | 1:3.00 | | 1:5.67 | | 垂直 |
| 降雨强度/(mm·h ⁻¹) | | 63.00~70.00 | | 73.80 | | 3.23 |
| 降雨时长/h | | 10~15 | | 4 | | 24 |
| 降雨量/mm | | 700.00 | 787.50 | 945.00 | 295.20 | 77.50 |
| 入渗量/mm | | 213.80 | 184.20 | 74.50 | 214.00 | 67.10 |
| 存储量(包含蒸发量)/mm | | 168.80 | 150.40 | 64.30 | 17.40 | 18.40 |
| 渗漏量/mm | | 20.60 | 6.60 | 0 | 0 | 24.60 |
| (入渗量/降雨量)/% | | 7.88~30.54 | | 72.49 | | 86.63 |
| (存储量(包含蒸发量)/入渗量)/% | | 78.94~86.33 | | 8.13 | | 27.42 |
| (渗漏量/入渗量)/% | | 0~9.63 | | 0 | | 36.65 |
| 数据来源 | | 邓林恒 ^[21] | | 贾官伟 ^[32] | | 焦卫国 ^[9] |
| | 材料 | 掺入 3.2% 膨润土的粉土 | | 粉土 | 黄土 | |
| 持水层 | 厚度/cm | 20 | | 100 | 60 | |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | 5.30×10^{-7} | | 1.40×10^{-7} | 1.29×10^{-7} | |
| 导排层 | 材料 | 砂 | | 砂 | — | |
| | 厚度/cm | 10 | | 20 | — | |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | 3.84×10^{-4} | | 2.00×10^{-4} | — | |
| 排水层 | 材料 | 碎石 | | 碎石 | 碎石 | |
| | 厚度/cm | 10 | | 20 | 30~45 | |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | 2.00×10^{-2} | | 7.10×10^{-3} | 0.24 | |
| 防渗层 | 材料 | — | | — | — | |
| | 厚度/cm | — | | — | — | |
| | $k_s/(m \cdot s^{-1})$ | — | | — | — | |
| 坡度 | | 1:3.00 | | 1:3.00 | 1:3.40 | |
| 降雨强度 | | 杭州一年正常降雨 | | 杭州一年正常降雨 | 2.98~3.00 mm/h | |
| 降雨时长 | | 杭州一年正常降雨 | | 杭州一年正常降雨 | 7 d | |
| 降雨量/mm | | 1159.30 | | 1273.90 | 194.90~214.80 | |
| 入渗量/mm | | 903.30 | | 1031.80~1047.10 | 194.90~213.10 | |
| 存储量(包含蒸发量)/mm | | 840.80 | | 1031.60~1047.00 | 157.80~199.60 | |
| 渗漏量/mm | | 0.40 | | 0 | 13.50~37.00 | |
| (入渗量/降雨量)/% | | >59.88 | | 81.00~82.20 | >99.21 | |
| (存储量(包含蒸发量)/入渗量)/% | | >79.97 | | 99.97~99.99 | 80.99~93.65 | |
| (渗漏量/入渗量)/% | | <0.31 | | 0 | 6.35~19.01 | |

2.2 持水层存储量

在本文数值模拟中,没有考虑地表蒸发作用。

对于暴雨工况,由于降雨耗时短且空气湿度大,可以忽略蒸发量。对于长时间降雨和正常降雨工

况,由于降雨时间长,不可忽略蒸发作用^[14]。根据《杭州市志·自然环境篇》^[37]数据统计,杭州地区的梅汛期主要在6—7月,此时月平均蒸发量高达170.00~230.00 mm,本文将平均值200.00 mm作为长时间降雨模拟工况的月蒸发量。此外,贾官伟^[32]计算得到杭州地区的年潜在蒸发量为1010.60 mm,本文将该值作为正常降雨工况下的年平均蒸发量。

考虑了蒸发量的持水层存储量模拟结果如图9所示。在相同降雨条件和坡度工况下,随着持水层厚度增加,持水层存储量逐渐增大。在暴雨和长时间降雨工况下,这种增大趋势逐渐减缓,但在正常降雨工况下这种增大趋势持续发展。例如,在暴雨及

坡度为1:2条件下,当持水层厚度从0.30 m增加至1.50 m再增加至1.80 m时,存储量从44.75 mm增大至173.04 mm再进一步增大至179.87 mm;在正常降雨及坡度为1:2条件下,当持水层厚度从0.30 m增加至1.50 m再增加至1.80 m时,存储量从43.67 mm增大至225.17 mm再进一步增大至266.56 mm。在相同降雨条件和持水层厚度工况下,存储量随坡度变陡而减小,但变化幅度较小,一般小于10.00 mm。例如,在长时间降雨及持水层厚度为2.10 m条件下,当坡度为1:4,1:3,1:2和1:1时,存储量分别为425.64,423.94,422.99 mm和420.25 mm。上述结果表明,相比于持水层厚度,坡度对持水层存储量的影响较小。

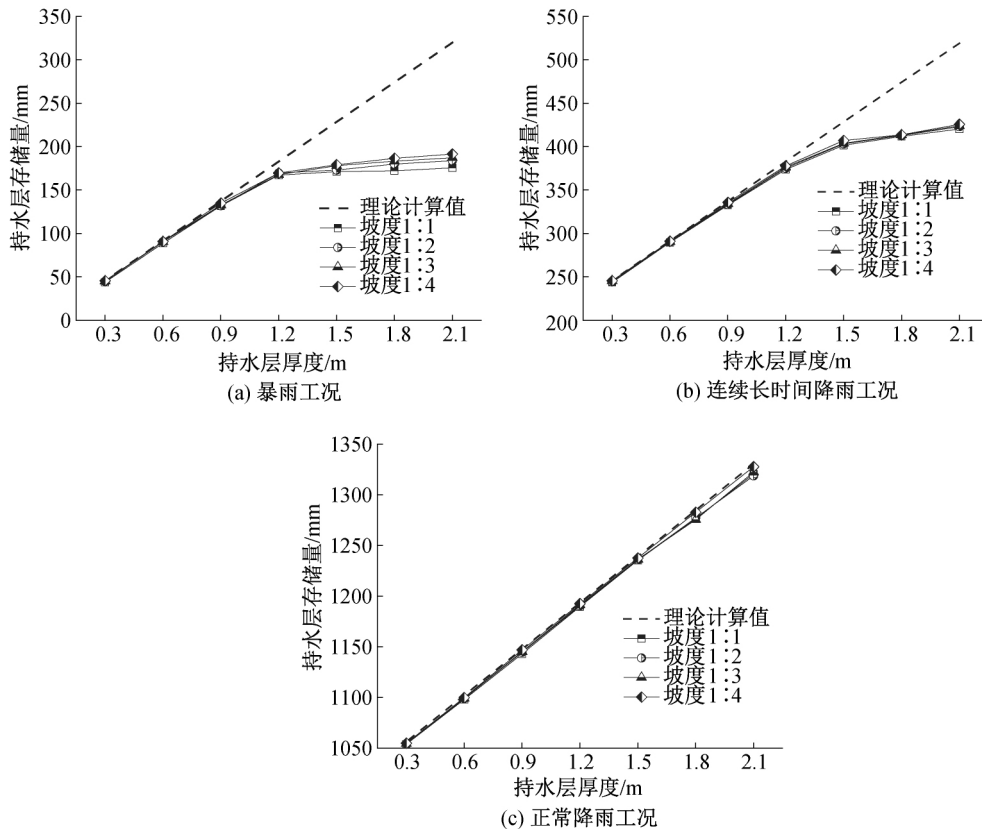


图9 不同工况下持水层存储量随持水层厚度变化曲线

考虑了蒸发量的持水层存储量与入渗量的比值结果如图10所示。当覆盖层坡度在1:1~1:4、持水层厚度为0.30~2.10 m时,暴雨条件下的存储量/入渗量介于23.00%~85.00%,连续长时间降雨条件下的存储量/入渗量介于58.00%~100.00%,正常降雨条件下的存储量/入渗量介于78.00%~98.00%。根据上文提出的毛细阻滞型土质覆盖层综合性能评价体系,为了满足持水性能要求,暴雨工况下的持水层厚度需达到0.90 m及以上,长时间降雨工况下的持

水层厚度需达到0.60 m及以上时,正常降雨工况下所有计算工况均满足要求。因此,使用本文所采用的建筑垃圾构建毛细阻滞型土质覆盖层时,持水层厚度应大于0.90 m。此外,从表4可以看出,在暴雨条件下,本文计算的存储量/入渗量结果要低于邓林恒^[21]试验数据。在连续长时间降雨条件下,本文计算的存储量/入渗量结果与焦卫国^[9,14,20]试验数据较为接近。在正常降雨条件下,本文计算的存储量/入渗量结果与邓林恒^[21]试验数据较为接近。

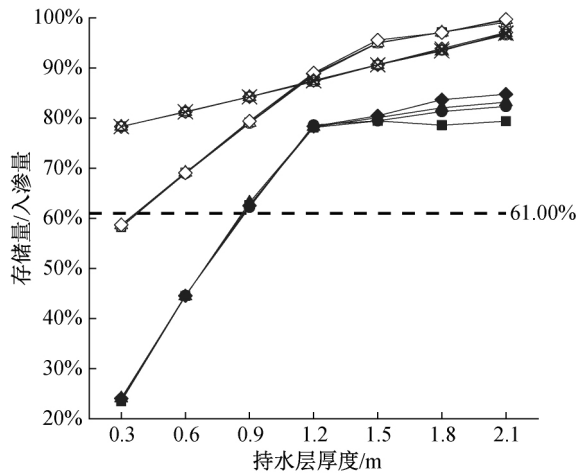


图 10 持水层存储量/入渗量随持水层厚度变化曲线

Stormont^[38]认为持水层存储量主要与土体初始含水量和持水性能以及土层厚度有关,可以通过式(1)进行计算:

$$S = \int_0^{L_c} (\theta - \theta_0)(z + p_b) dz \quad (1)$$

其中: S 为持水层存储量, m ; p_b 为排水层进水值; θ_0 为持水层土体初始体积含水量; θ 为持水层土体的当前体积含水量; L_c 为持水层厚度, m ; z 为计算点与持水层底部的距离, m 。

由此可见,在相同降雨条件和覆盖层坡度下,持水层厚度越大,持水层存储量也就越大。此外,降雨入渗过程也会影响持水层存储量。随着雨水逐渐入渗到持水层土体中,土体的基质吸力逐渐减小至接近进气值,持水层存储量则逐渐增大至达到极限值并最终趋于稳定。根据上述公式计算得到不同持水层厚度对应的极限存储量如图 9 所示。在暴雨条件下,随着持水层厚度的增大,计算得到的持水层存储量逐渐偏离极限存储量,转折点在持水层厚度约为 0.90 m 处;在连续长时间降雨条件下,变化规律与暴雨条件较为一致,但其转折点在持水层厚度约为 1.20 m 处;在正常降雨条件下,计算得到的持水层存储量几乎与极限存储量重合。这主要是因为降雨入渗过程中,持水层土体饱和区逐渐从顶部下移至底部,持水层厚度越大,这个过程所经历的时间也就越长^[12-13]。在 7 h 暴雨和 30 d 连续降雨工况下,均在持水层厚度超过一定值后,土体饱和区没能到达底部,从而逐渐偏离极限存储量。

2.3 防渗层渗漏量

防渗层渗漏量模拟结果如图 11 所示。在相同降雨条件和坡度工况下,随持水层厚度增加,防渗层渗漏量逐渐减小。例如,在正常降雨、坡度为 1:2 条件下,当持水层厚度从 0.30 m 增加至 1.50 m 再增加至 1.80 m 时,渗漏量从 29.48 mm 增大至 18.14 mm 再进一步增大至 17.36 mm。在相同降雨条件和持水层厚度工况下,渗漏量随坡度变陡而减小。例如,在长时间降雨、持水层厚度为 2.10 m 条件下,当坡度为 1:4, 1:3, 1:2 和 1:1 时,渗漏量分别为 3.49, 2.43, 1.69 mm 和 0.85 mm。在相同坡度和持水层厚度工况下,渗漏量在暴雨工况下较小,长时间降雨工况下次之,正常降雨工况下较大。例如,在持水层厚度为 2.10 m、坡度为 1:2 条件下,暴雨、长时间降雨、正常降雨下渗漏量分别为 0.87, 1.69, 15.92 mm。上述结果表明,相比于坡度,持水层厚度对防渗性能影响较大。

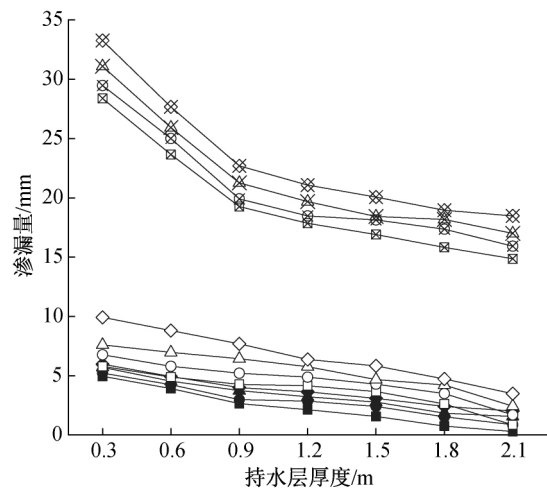


图 11 入渗量随持水层厚度变化曲线

防渗层渗漏量与入渗量的比值结果如图 12 所示。当坡度在 1:1~1:4、持水层厚度为 0.30~2.10 m 时,暴雨条件下的渗漏量/入渗量小于 4.00%,连续长时间降雨条件下的渗漏量/入渗量小于 3.00%,正常降雨条件下的渗漏量/入渗量介于 1.00%~3.00%。根据模拟结果,杭州年降雨入渗量平均为 1359.06 mm,此时 30.00 mm/当地年入渗量的值为 2.21%,确定防渗指标为渗漏比小于 2.21%。当持水层厚度为 0.30 m 时,长时间降雨

工况、坡度为1:1, 1:2, 1:3以及正常降雨工况、坡度为1:1, 1:2时满足防渗要求,其余各工况均不满足防渗要求;当持水层厚度为0.60 m时,暴雨工况、坡度为1:3, 1:4时不满足防渗要求,其余工况均满足要求。综上所述,使用本文所采用的建筑垃圾构建毛细阻滞型土质覆盖层时,持水层厚度需大于0.90 m。此外,从表4可以看出,在暴雨条件下,本文计算的渗漏量/入渗量结果要高于Ng等^[28]试验数据;在连续长时间降雨和正常降雨条件下,本文计算的渗漏量/入渗量均要高于邓林恒^[21]试验数据,但低于贾官伟^[32]试验数据。

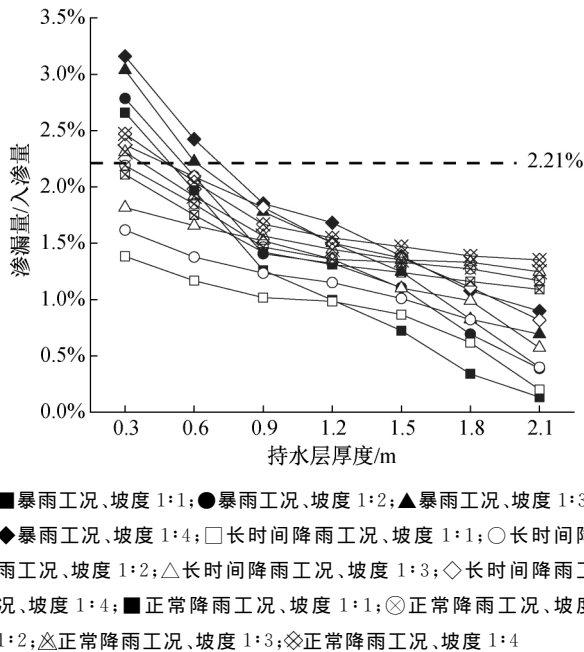


图12 渗漏量/入渗量随持水层厚度变化曲线

根据达西定律可知,防渗层渗漏量的主要影响因素有防渗层顶部压力水头、防渗层渗透系数等,压力水头越高、渗透系数越大,则渗漏量越大。持水层厚度越大,则持水层存储量越大,进入到导排层的水量就越少,导排层水头就越低,从而防渗层渗漏量就越小。覆盖层边坡坡度越大,则持水层和导排层的侧向导排量越大,导排层水头就越低,从而防渗层渗漏量也越小。

2.4 边坡稳定性

覆盖层边坡稳定安全系数模拟结果如图13所示。在相同降雨条件和覆盖层边坡坡度工况下,边坡稳定安全系数与持水层厚度的相关性不明显。例如,在正常降雨及坡度为1:2条件下,当持水层厚度从0.30 m增加至1.20 m再增加至1.80 m时,边坡稳定安全系数从1.996变化至2.020再进一步变化至1.910,变化幅度不大且无明显规律。在相同

降雨条件和持水层厚度工况下,边坡稳定安全系数随坡度变陡而减小,覆盖层越容易失稳坍塌。例如,在长时间降雨及持水层厚度为2.10 m条件下,当坡度为1:4, 1:3, 1:2和1:1时,边坡稳定安全系数分别为3.053, 2.520, 1.886和1.270。在相同坡度和持水层厚度工况下,边坡稳定安全系数随雨强的增大而减小。例如,在持水层厚度为2.10 m及坡度为1:2条件下,暴雨、长时间降雨、正常降雨下边坡稳定安全系数分别为1.769, 1.886, 1.898。上述结果表明,边坡坡度、降雨强度对边坡稳定安全系数影响较大,持水层厚度则影响较小。当坡度为1:2~1:4以及持水层厚度为0.30~2.10 m时,边坡稳定安全系数均大于临界值1.35,满足稳定性控制要求。当坡度为1:1时,各持水层厚度下均不满足稳定性要求。因此,使用本文所采用的建筑垃圾构建毛细阻滞型土质覆盖层时,覆盖层坡度不得大于1:2。

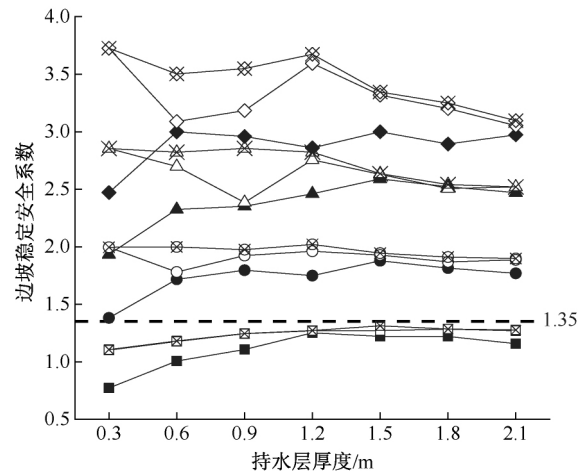


图13 安全系数随持水层厚度变化曲线

影响覆盖层边坡稳定性的因素主要有坡度、土体容重、土体抗剪强度参数、水位高度等。边坡坡度越大,则土体自重应力产生的滑动力越大,抗滑力越小,从而稳定安全系数越小。降雨强度对边坡稳定性的影响主要体现在以下几个方面^[39-40]:a)当降雨强度小于土体入渗率时,降雨量几乎能够全部渗入土体,雨水入渗会导致覆盖层顶部逐渐达到饱和状态,并不断向深部延伸,这将造成暂态饱和区土体抗剪强度弱化、有效应力减小,从而覆盖层稳定性降低;b)当降雨强度大于土体入渗率时,部分降雨量

渗入土体,另一部分则形成坡面径流而流走,而坡面径流会对覆盖层坡面造成冲刷破坏,从而覆盖层稳定性降低。

3 结论及建议

本文首先通过文献数据总结建立了毛细阻滞型覆盖层综合性能评价体系,然后以杭州市降雨条件为研究背景,利用 Geo-Studio 软件对以再生细骨料为持水层和营养植被层填料、再生粗骨料为排水层填料、固化泥饼为防渗层填料的毛细阻滞型覆盖层的综合性能进行了分析,主要获得以下结论:

a)以持水能力、防渗性能和抗滑稳定性作为评价指标,建立了毛细阻滞型土质覆盖层综合性能评价体系。当渗漏比小于 30.00 mm/当地年降雨入渗量,存储量(包括蒸发量)大于降雨入渗量的 61.00%,抗滑稳定安全系数大于 1.35 时,认为覆盖层综合性能良好。

b)随着持水层厚度增大,降雨入渗量增大;暴雨条件下的入渗量/降雨量要远小于连续长时间降雨和正常降雨条件。

c)随着持水层厚度增大,持水层存储量逐渐增大;这种增大趋势在暴雨和长时间降雨工况下逐渐减缓,在正常降雨工况下持续发展。

d)随着持水层厚度和边坡坡度增大,防渗层渗漏量逐渐减小;持水层厚度和边坡坡度越大,均会造成导排水头减小,从而防渗层渗漏量就减少。

e)边坡稳定安全系数受边坡坡度和降雨强度的影响较大,受持水层厚度影响较小。

根据毛细阻滞型土质覆盖层综合性能评价体系评价结果,利用建筑垃圾替代传统土料的毛细阻滞型土质覆盖层应用于湿润气候区是可行的。若毛细阻滞型覆盖层以再生细骨料为持水层和营养植被层填料、再生粗骨料为排水层填料、固化泥饼为防渗层填料且应用于湿润气候区时,建议该覆盖层坡度应小于 1:2,持水层厚度应大于 0.90 m。

参考文献:

[1] 刘斌. 建筑垃圾再生细骨料及微粉制备再生砂浆试验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2019: 1-5.
[2] 罗志. 建筑垃圾的处理现状及资源化处理工艺研究[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(3): 76-77.
[3] 郭艳. 建筑垃圾循环利用 道路曲折前景广阔: 下[J]. 资源再生, 2018(2): 16-21.
[4] 莫开生, 陈建国, 陈宗平, 等. 建筑垃圾再生骨料在水利工程的应用[J]. 绿色环保建材, 2020(3): 234-236.

[5] 李强, 申玲, 陈芊与. 基于循环经济的建筑垃圾资源化利用文献综述[J]. 工程经济, 2020, 30(2): 68-72.
[6] 桂志伟, 俞进进, 蔡立弘, 等. 中日城市建筑垃圾处置技术、政策对比研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(1): 34-39.
[7] 张肖明, 黄沛增, 崔庆怡. 建筑垃圾再生微粉泡沫混凝土性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 96-98.
[8] Zhan L T, Zhang Z, Chen Y M, et al. The 2015 Shenzhen catastrophic landslide in a construction waste dump: Reconstitution of dump structure and failure mechanisms via geotechnical investigations [J]. Engineering Geology, 2018, 238: 15-26.
[9] 焦卫国. 西北黄土/碎石覆盖层水分存储—释放机理及防渗设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 1-6, 42-44, 117-169.
[10] 兰吉武, 杨新海, 高康. 填埋场封场覆盖系统排水层的设计及应用[J]. 环境卫生工程, 2004, 12(4): 248-251.
[11] 牛立志, 牛大鹏. 利用建筑垃圾进行山体生态恢复[J]. 建筑, 2017(24): 25-26.
[12] 张文杰, 耿潇. 垃圾填埋场毛细阻滞型防渗封场工作机理及性能分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 454-459.
[13] 张文杰, 林午, 董林兵. 垃圾填埋场毛细阻滞型防渗封场模型试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1263-1268.
[14] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 含非饱和导排层的毛细阻滞覆盖层长期性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(6): 1101-1109.
[15] 邱清文. 黄土-碎石覆盖层水气耦合运移规律及填埋气减排性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 8-10, 23-30.
[16] 赵士旺. 干湿循环条件下垃圾填埋场毛细阻滞式覆盖层研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 2-6, 32-78.
[17] Chen C. Meteorological Conditions for Design of Monolithic Alternative Earthen Covers (AEFCs) [D]. Madison: University of Wisconsin, 1999: 26-84.
[18] Benson C H, Albright W H, Roesler A C, et al. Evaluation of final cover performance: Field data from the Alternative Cover Assessment Program (ACAP) [C/OL]// The 2nd Conference of Waste Management, Tucson, AZ, USA, 2002. <https://www.researchgate.net/publication/229045314>.
[19] 焦卫国, 詹良通, 兰吉武, 等. 黄土—碎石覆盖层毛细阻滞效应及设计厚度分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(11): 2128-2134.
[20] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 黄土—碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1149-1157.

- [21] 邓林恒. 湿润气候区毛细阻滞型覆盖层性能试验研究及其工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 33-82.
- [22] Rahardjo H, Santoso V A, Leong E C, et al. Use of recycled crushed concrete and Secudrain in capillary barriers for slope stabilization [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6):662-673.
- [23] Wong J T F, Chen X W, Mo W Y, et al. Restoration of plant and animal communities in a sanitary landfill: a 10-year case study in Hong Kong [J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(3):490-499.
- [24] Ng C W W, Lu B W, Ni J J, et al. Effects of vegetation type on water infiltration in a three-layer cover system using recycled concrete[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2019, 20(1):1-9.
- [25] Kalonji Kabambi A, Bussière B, Demers I. Hydrogeological Behaviour of Covers with Capillary Barrier Effects Made of Mining Materials [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(3):1199-1220.
- [26] Mbonimpa M, Bouda M, Demers I, et al. Preliminary geotechnical assessment of the potential use of mixtures of soil and acid mine drainage neutralization sludge as materials for the moisture retention layer of covers with capillary barrier effects [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(5): 828-838.
- [27] Rahardjo H, Prasad A, Satyanaga A, et al. 1D infiltration behavior of two-layered recycled concrete aggregates using hydrophobic materials in a column apparatus [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(8): 04017053.
- [28] Ng C W W, Liu J, Chen R, et al. Physical and numerical modeling of an inclined three-layer (silt/gravelly sand/clay) capillary barrier cover system under extreme rainfall [J]. Waste Management, 2015, 38:210-221.
- [29] 中国气象局国家气象信息中心. 中国气象数据网 (CMDC) [EB/OL]. (2015-06-01) [2020-10-22] https://data.cma.cn/dataService/cdcindex/datacode/A.0012.0001/show_value/normal.html.
- [30] 詹良通, 焦卫国, 孔令刚, 等. 黄土作为西北地区填埋场覆盖层的可行性及设计厚度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(12):3361-3369.
- [31] Albright W H, Benson C H, Gee G W, et al. Field water balance of landfill final covers [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(6):2317.
- [32] 贾官伟. 固废堆场终场土质覆盖层中水分运移规律及调控方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 135-180.
- [33] 王康, 刘川顺, 王富庆, 等. 腾发覆盖垃圾填埋场覆盖层机理试验研究及结构分析[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2307-2314.
- [34] 年庚乾, 陈忠辉, 张凌凡, 等. 边坡降雨入渗问题中两种边界条件的处理及应用[J/OL]. 岩土力学, 2020(12): 1-11 [2020-10-14]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0338>.
- [35] 邵明申, 裴强强, 王思敬, 等. PS 非饱和入渗的现场试验[J]. 敦煌研究, 2012(3):116-121.
- [36] 简文彬, 黄聪惠, 罗阳华, 等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1123-1133.
- [37] 杭州市地方志编纂委员会. 杭州市志(1986—2005): 第1卷[M]. 北京: 中华书局, 2015: 305-320.
- [38] Stormont J C. The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1996, 14(4):243-267.
- [39] Yin Y P, Li B, Wang W P, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization[J]. Engineering, 2016, 2(2): 230-249.
- [40] 林呀. 粘土心墙坝库水位骤降偶遇不同类型降雨上下游坝坡渗流与稳定数值模拟[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(5):36-41.

(责任编辑:康 锋)