

湿陷性黄土地区海绵城市建设湿陷性 风险模拟评估研究

李昌镐¹, 侯精明¹, 刘海松², 杨瑾³, 王镇中³, 刘洋³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省西咸新区空港新城规划建设局, 陕西 咸阳 712035)

摘要: 在湿陷性黄土地区开展雨水集中下渗的海绵城市建设面临着湿陷变形的风险,以黄土湿陷性较为严重的西咸新区空港新城临空产业区为例,采用数值模拟的方法模拟了研究区湿陷性黄土在不同设计降雨情况下的雨水集中入渗后的湿陷情况。应用 GAST 模型计算雨洪过程,并将降雨量下渗过程作为边界条件输入 Midas GTS/NX 软件来模拟黄土基础变形情况。通过分析 5 个典型黄土区因降雨下渗导致的湿陷量,发现其等级为 II 级及以上,其中最严重情况下的雨水下渗深度为 5.02 ~ 6.51 m,总湿陷量和自重湿陷量分别为 468.18 ~ 1 015.56 mm 和 88.99 ~ 239.03 mm,湿陷等级为 III 级。可见局部集中下渗会导致较高的湿陷风险,故建议在湿陷性黄土地区海绵城市建设中应进行量化评估并合理规避湿陷风险。

关键词: 湿陷性黄土; 海绵城市; 全水动力数值模型; 年径流控制率; 湿陷性风险评估

中图分类号: P642.13

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0220-06

Study on simulation assessment of collapsible risk of sponge city construction in collapsible loess area

LI Changhao¹, HOU Jingming¹, LIU Haisong², YANG Jin³, WANG Zhenzhong³, LIU Yang³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Planning and Construction Bureau of Airport New Town, Xixian New Area, Shaanxi Province, Xianyang 712035, China)

Abstract: The sponge city construction in areas with collapsible loess is faced with the risk of collapse deformation. Taking the airport industrial zone of Airport New Town in Xixian New Area as an example, the collapsibility of collapsible loess under different rainfall conditions was numerically simulated. The rainfall flood process was calculated using GPU accelerated surface water flow and transport (GAST) model, and the rainfall infiltration process was introduced to Midas GTS/NX software as the boundary condition to simulate the deformation of loess foundation. Based on the analysis of five typical loess regions with collapse deformation, it is found that the collapsibility of the five regions are all classified as grade II and above. The depth of rainwater infiltration under the most serious condition is 5.02 ~ 6.51 m, the total collapsibility and dead weight collapsibility are 468.18 ~ 1 015.56 mm and 88.99 ~ 239.03 mm respectively, which is classified as grade III collapsibility. Therefore, it is suggested that quantitative assessment and reasonable avoidance of collapsible risk should be carried out in the construction of sponge city in collapsible loess area.

Key words: collapsible loess; sponge city; full hydrodynamic numerical model; volume capture ratio of annual runoff; simulation assesment of collapsible risk

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609199); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402704); 陕西省水利科技项目(2017slki-14)

作者简介: 李昌镐(1996-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事城市水利模拟计算研究。

通讯作者: 侯精明(1982-), 男, 河北怀安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地表水及其附随过程数值模型研究。

1 研究背景

近年来,极端降水事件增多导致内涝灾害频发^[1],例如 2016 年西安小寨地区发生的内涝给当地带来了严重的社会危害和经济损失。海绵城市建设实施使得我国部分地区城市水问题有所改善,原来积滞的水通过各种海绵措施可集中下渗、蓄存等。但海绵城市建设不能生搬硬套,而且在湿陷性黄土地区,海绵城市改造导致的集中入渗使土壤快速饱和,更容易因地球脉动现象而引起饱和和黄土液化,最终进一步增加黄土湿陷的可能^[2]。本文以存在黄土湿陷可能的西咸新区空港新城临空产业区为例,切入研究。

西咸新区为我国首批海绵城市建设试点,同时区域内分布着湿陷等级 I 级到 IV 级不等的湿陷性黄土。马越等^[3]通过将秦皇大道划分为 5 个子汇水分区,针对西咸新区某道路湿陷性黄土地质和原土渗透性差的现状提出诸如分段设置传输型草沟和雨水花园、将人行道不透水铺装改为透水铺装等针对性的 LID(低影响开发,low impact development)改造措施;侯精明等^[4]以西咸新区为例从建筑小区尺度研究了 LID 措施不同前期条件对径流控制和峰值削减的影响,量化了不同降雨量、不同前期条件的影响效果;韩松磊^[5]从宏观到微观角度,以西安为例对湿陷性黄土地区海绵城市建设进行了探索,同时针对不同用地类型的湿陷性黄土区域,分别提出了相关的设计和建设技术要求;柴少波等^[6]根据黄土地区海绵城市中邻近建筑物的 LID 设施的工程实际建立了 LID 设施渗流对建筑地基影响的数值计算模型,以含水量和沉降等作为研究的切入点,研究了雨水通过 LID 设施入渗邻近建筑地基的影响。以上研究从数值模型和工程实际等出发,探索研究了 LID 措施或湿陷性黄土区域海绵城市建设的要求和效果。

评价黄土湿陷性的传统方法通常为室内浸水压缩试验^[7],没有考虑自然降雨入渗情况下黄土湿陷的具体情况,而地面荷载和雨水集中入渗等变化,也可能带来湿陷性黄土地区发生地基沉降变形等风险^[8],基于此,在海绵城市建设中,雨水花园等海绵改造措施旨在将雨水进行集中、有效的处理,极有可能带来黄土湿陷的风险。本文采用精细模型量化分析黄土湿陷对不同自然降雨集中入渗的响应效果,对湿陷性黄土地区海绵城市建设有着重要参考意义。

本文以西咸新区空港新城临空产业区为例,引入一套高效高精度的基于 GPU(图形处理器,graph-

ics processing unit)加速的地表水及其附随过程数值模型 GAST(GPU accelerated surface water flow and transport)^[9]对研究区域降雨径流过程进行模拟,同时以集中降雨作为边界条件,对雨水在土体中的下渗情况进行模拟,根据湿陷性黄土地区建筑规范^[10]对研究区域黄土湿陷风险作出评估。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

西咸新区东距西安市中心 10 km,西距咸阳市中心 3 km,是西安国际化大都市未来拓展的重点区块^[11],本文研究区域位于西咸新区空港新城内,即西安咸阳国际机场西北侧的一片城区,并选取自贸大道与长平大街交汇处、自贸大街、宜平大街、北杜大街包含草地、林地、裸地 3 种土地利用类型在内的 4 个区域进行双环实验,实地量测不同土地利用情况的下渗参数。同时选取典型黄土区:将空港新城 KGHX-2013-07 号地块定为场地 1、保障房项目 A 区为场地 2、北杜(空港阳光里)项目市政工程场地为场地 3、园区北大道(园区大道-第五大道)市政工程场地为场地 4、园区十路(A-5 路-园区二路)市政工程场地为场地 5,并在 5 个场地现场取样,于室内进行变水头渗透试验,测试马兰黄土(L₁)、第一层古土壤(S₁)和第一层离石黄土(L₂)3 种土层的渗透系数,用于后续湿陷等级评价,土壤下渗测量和土质分析取样点位分布如图 1 所示。

分析所测的土壤下渗数据,由霍顿公式拟合出典型土地利用类型下渗参数取值见表 1。

表 1 研究区典型土地利用类型下渗参数取值			
测点	土地利用类型	最大下渗率/ (mm·h ⁻¹)	稳定下渗率/ (mm·h ⁻¹)
自贸大道与长平大街交汇处	草地	322.7	13.66
自贸大街	林地	123.3	40.71
宜平大街	裸地	1120	39.64
北杜大街	草地	259	9.187

测试马兰黄土(L₁)、第一层古土壤(S₁)和第一层离石黄土(L₂)3 种土层的渗透系数,最终计算时采用 3 种土层的平均渗透系数,见表 2。

2.2 研究方法

收集整理研究区基础数据,主要包括管网、地形、降雨等数据。不同土地利用类型下渗数据根据

现场双环实验得到,其他资料由空港新城管委会提供。首先采用全水动力雨洪模型对研究区域不同重现期降雨下径流控制率和雨水下渗量进行评估,然后根据下渗水量对研究区下渗深度和黄土湿陷情况进行评估。具体技术路线图见图 2。

表 2 各土层平均渗透系数 cm/s

马兰黄土 (L ₁)	第一层古 土壤(S ₁)	第一层离石 黄土(L ₂)
6 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁻⁴

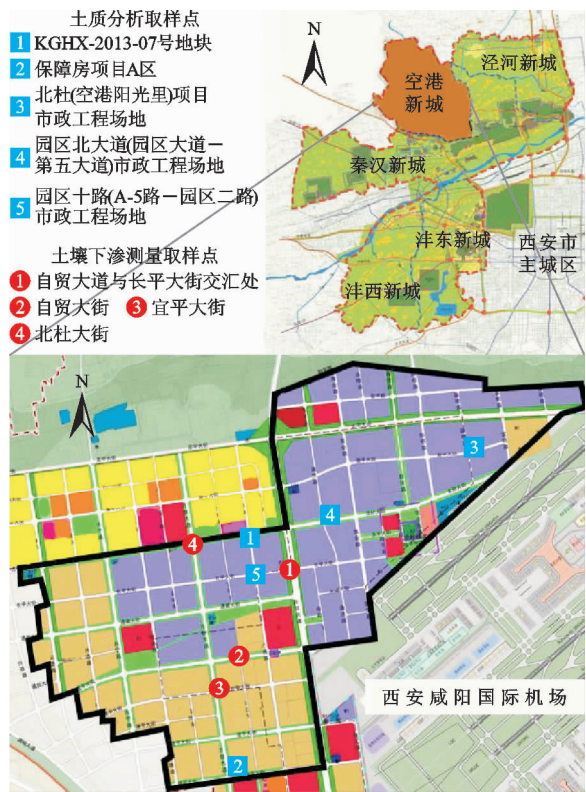


图 1 研究区土壤下渗测量和土质分析取样点分布图

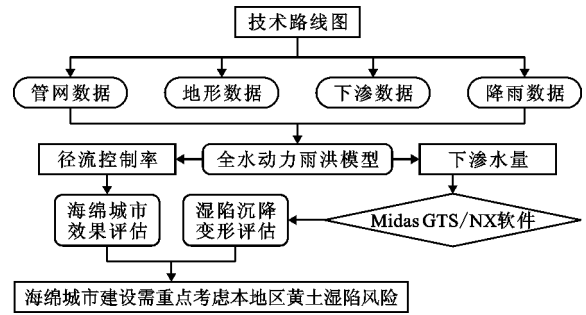


图 2 研究方法技术路线图

2.2.1 控制方程

(1)雨洪模型控制方程。本模型采用忽略了运动黏性项、紊流黏性项、风应力和科氏力的二维非线性浅水方程(SWEs),方程的守恒格式可用如公式

(1)的矢量形式来表示。

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial y} = \vec{S} \tag{1}$$

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\vec{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x - S_{fx} \\ -gh\partial z_b/\partial y - S_{fy} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中: $\vec{q}$ 为变量矢量; h 为水深,m; q_x 和 q_y 分别为 x 和 y 方向的单宽流量,m²/s; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的流速,m/s; $\vec{F}$ 和 $\vec{G}$ 分别为 x 和 y 方向的通量矢量; $\vec{S}$ 为源项矢量,包括净雨源项、底坡源项和摩阻源项;摩阻源项 $S_{fx} = gn^2u \sqrt{u^2 + v^2}/h^{1/3}$ 、 $S_{fy} = gn^2v \sqrt{u^2 + v^2}/h^{1/3}$,其中 n 为曼宁系数。

(2)雨洪模型数值算法。地表水动力部分采用 Godunov 格式的有限体积法对圣维南方程进行全耦合数值求解^[12]。在控制单元内,模型采用 HLLC 近似黎曼求解器计算界面上的水和动量通量;底坡源项采用底坡通量法处理,使得在计算过程中能与界面通量很好协调,更能满足全稳条件;摩阻力则用稳定性最佳的半隐式法来计算;摩阻源项采用二阶显式 Runge Kutta 方法来保证时间积分的二阶精度^[13]。该模型已在文献[14]中得到验证,本文不再赘述。

(3)黄土湿陷模拟方法。Midas GTS/NX 是迈达斯信息科技有限公司针对岩土与隧道工程领域开发的一款通用有限元软件,具有一定优势^[15]。何明^[16]在对基坑支护数值模拟研究中运用 Midas GTS/NX 软件对研究基坑进行了数值模拟分析,且监测数据与模拟数据总体偏差不大,模拟结果较为准确,可为开展类似工程的研究工作提供借鉴。而且 GTS/NX 软件通过渗流-应力完全耦合分析,可以一次性模拟与水位条件相关的岩土问题(渗流/应力/固结),还搭载有限元集成求解器,为复杂的工程分析和设计提供更加可靠的结果。因此,本文选用 Midas GTS/NX 软件对研究区的黄土湿陷情况

进行模拟分析。

主要依据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025-2004)^[10]中湿陷性黄土场地自重湿陷量计算式(公式6)和总湿陷量计算式(公式7)进行计算。

$$\Delta z s=\beta_0 \sum_{i=0}^n \delta_{z s i} h_i \quad(6)$$

$$\Delta s=\sum_{i=0}^n \beta \delta_{s i} h_i \quad(7)$$

式中: $\Delta z s$ 为自重湿陷量,mm; Δs 为总湿陷量,mm; $\delta_{z s i}$ 为第 i 层土的自重湿陷系数; $\delta_{s i}$ 为第 i 层土的湿

陷系数; h_i 为第 i 层土的厚度,mm; β_0 为地区修正系数; β 为浸湿及侧挤修正系数。

2.2.2 基础参数 根据西咸新区管委会提供的《西咸新区土地利用规划 2011-2020》对研究区域进行土地利用划分,主要包括绿地、道路、房屋等。研究区域地形高程采用空港新城管委会提供的 1:2 000 地形数据,通过克里金插值法得到,网格精度为 3 m,共计 350×10^4 个方形网格单元。地形高程及土地利用划分见图 3,研究区域内具体土地利用类型面积占比及曼宁值^[17-18]见表 3。

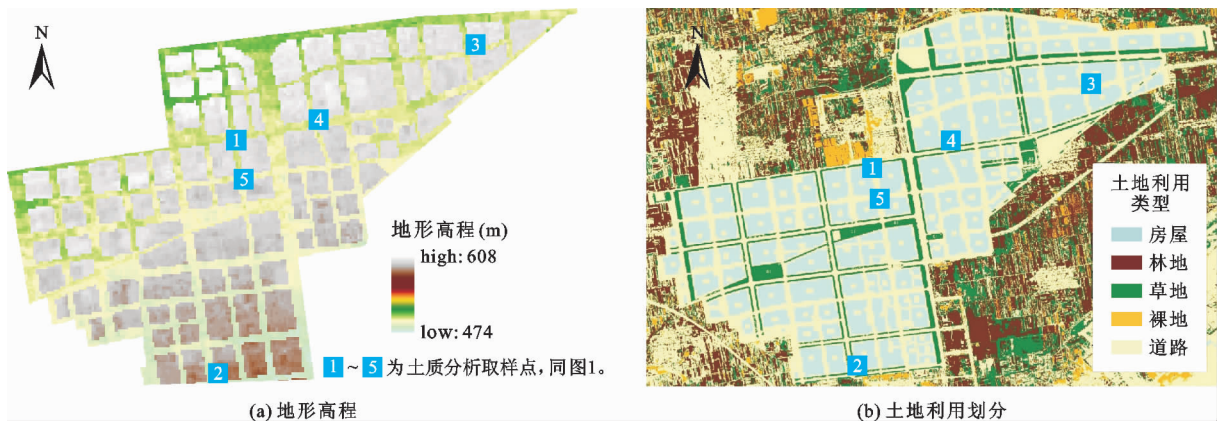


图 3 研究区域地形数据及土地利用划分

表 3 土地利用类型面积占比及曼宁值

土地类型	占比/%	曼宁值
房屋	18.45	0.015
林地	22.12	0.400
草地	14.36	0.240
裸地	3.11	0.080
道路	41.96	0.014

通过 Midas GTS/NX 软件建立模型,因选取的 5 个场地具体工程不同,考虑本次计算仅关注雨水入渗深度,因此未考虑尺寸效应。雨水入渗数值计算模型及入渗边界见图 4,具体尺寸如下:

模型长度 100 m,宽度 100 m,厚度 13 m,其中 L_1 马兰黄土厚度 8 m, S_1 第一层古土壤厚度 2 m, L_2 第一层离石黄土厚度 3 m。由于后期建设的仓储区地面均会硬化成为隔水层,设计降雨下渗量只是绿地下渗水量,绿地面积占比为总区域的 12%,因此数值计算的降雨边界取上述模型的 3/25,即假定模型中 $100 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽) 的区域为绿地(图 4(b))。

本次数值计算基于水位随时间变化的瞬态分析,水分在黄土中的渗流服从达西定律^[19](公式 8、9)。

$$Q=k \cdot A \cdot i \quad(8)$$

$$v=k \cdot i \quad(9)$$

式中: Q 为渗流量, m^3/s ; v 为渗流断面平均渗透速度, m/s ; k 为黄土的渗透系数, m/s ; A 为截面面积, m^2 ; i 为水力梯度。

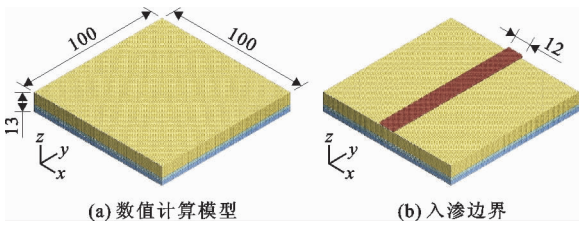


图 4 雨水入渗数值计算模型及入渗边界(单位:m)

5 个场地的模型土体建设参数详见表 4。

表 4 研究区各场地模型土体建设参数

场地	容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量/MPa	泊松比
1	14.7	13.4	0.28
2	14.7	13.6	0.29
3	15.2	13.9	0.30
4	14.4	12.7	0.28
5	14.7	13.5	0.28

模拟区域总面积为 13.02 km^2 ,参考相似区域西咸新区沣西新城海绵城市气象水文监测资料,2018 年 7 月 2 日降雨 30.72 mm,降雨历时 14 h,紧

接着在7月4日降雨26.8 mm,降雨历时15.5 h。同时在2018年7月2日至8日为持续降雨天气,总降雨量为83.43 mm。多次统计实测降雨情况发现,短历史多频次降雨在雨季多有发生。考虑湿陷性最不利情况,本次模拟计算选用连续2 h短历时强降雨。降雨雨型采用芝加哥雨型,西咸新区暴雨强度公式由西咸新区空港新城海绵城市技术中心提供(公式10),空港新城不同重现期降雨的2 h降雨雨型如图5所示。

$$q = \frac{1780.728 \times (1 + 2.3791 \lg P)}{(t + 20.82)^{0.880}} \quad (10)$$

式中: q 为降水强度,mm/min; t 为暴雨历时,min; P 为重现期,a。

模拟降雨重现期为1年一遇(16.65 mm)设计降雨重复3次,5年一遇(44.35 mm)、20年一遇(68.20 mm)设计降雨和设计日降雨量13.5 mm/d重复6次。

3 结果与分析

在降雨历时2 h情况下通过GAST模型对研究区域进行了降雨模拟计算,单次降雨模拟结果分别见表5和图6。由表5和图6可知,虽然区域不透水占比较大,但是通过绿地等透水区域下渗水量依然很大,下渗深度计算结果见表6。

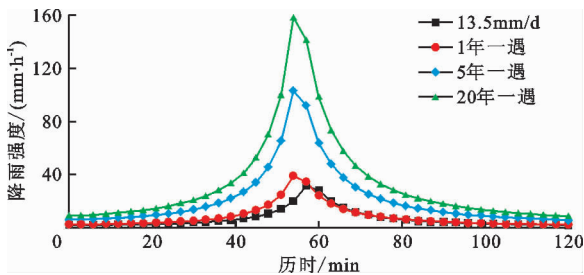
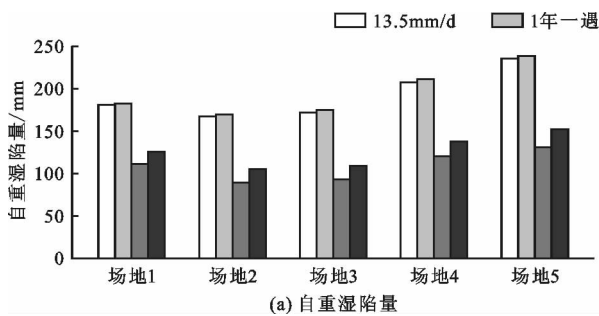


图5 模型不同重现期降雨2h设计降雨雨型

为进一步了解研究区域内黄土的湿陷量情况,分别将13.5 mm/d、1年一遇、5年一遇和20年一遇



重现期降雨在2 h降雨历时的4种工况在Midas GTS/NX软件中进行计算,选取5个场地中下渗最严重的场地4下渗量进行后续计算,其中场地4在20年一遇降雨情况下总水头剖面云图见图7。

表5 2 h设计降雨单次模拟结果

设计降雨 工况	区域面积/ km ²	降雨总体积/ m ³	出流量/ m ³	下渗量/ m ³
13.5 mm/d	13.02	175820	72388	40162
1年一遇	13.02	216844	101663	43972
5年一遇	13.02	577549	391618	59098
20年一遇	13.02	888200	659193	64572

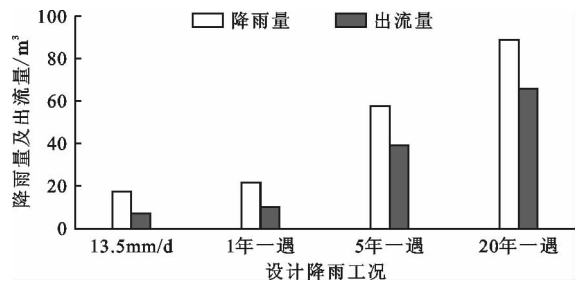


图6 2 h设计降雨单次模拟结果

表6 不同重现期降雨下渗深度计算结果

设计降雨工况	13.5 mm/d	1年一遇	5年一遇	20年一遇
下渗深度/m	6.06	6.51	5.02	5.42

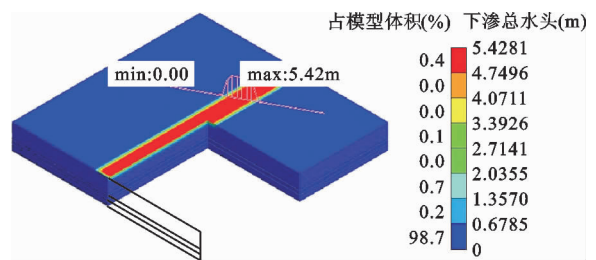


图7 场地4的20年一遇降雨下渗总水头剖面云图

分别对5个场地4种降雨工况下黄土地层的自重湿陷量及总湿陷量进行计算,其结果见图8。

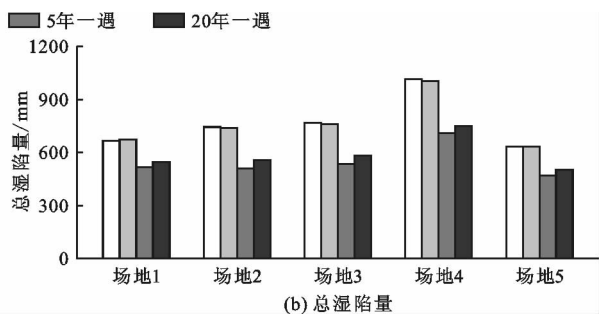


图8 各场地4种降雨情况下黄土地层的自重湿陷量及总湿陷量计算结果

由图8可看出,5个场地的自重湿陷量在小雨强(13.5 mm/d重复6次、1年一遇重复3次)情况下为167.67~239.03 mm,在大雨强(5年一遇、20年一遇重复6次)情况下,除场地2、3在5年一遇降雨的自重湿陷量分别为88.99、93.49 mm外,其余均在100 mm以上,雨强大小对湿陷量有所影响;5个场地总湿陷量在小雨强情况下均在600 mm以上,大雨强情况下除场地5在5年一遇工况下总湿陷量为468.18 mm外,其余均在500~750 mm之间。可见对于同一场地的整体情况而言,雨水下渗量越大,则土层湿陷量越大。

由计算结果可知:下渗深度受降雨量影响,即降雨量越大,则下渗深度越大,在雨水入渗后可能影响到的深度范围内,根据规范^[10],研究区域内所选场地湿陷等级多数已达到Ⅱ级或Ⅲ级级别。

4 结 论

为研究海绵城市建设后因LID措施导致的雨水集中入渗下的黄土湿陷风险,本文结合水动力模型和黄土湿陷沉降变形模型,对湿陷性黄土地区在进行海绵城市建设改造造成局部降雨集中入渗后的黄土湿陷风险进行模拟,结论如下:

(1)研究区不同重现期降雨下最严重地块下渗深度分别为6.06、6.51、5.02和5.42 m。

(2)在13.5 mm/d、1年一遇、5年一遇和20年一遇重现期降雨工况下,所选各场地的土层总湿陷量为468.18~1 015.56 mm,自重湿陷量为88.99~239.03 mm。整体来看,场地4湿陷等级达到Ⅱ级及Ⅲ级,在13.5 mm/d降雨工况下的总湿陷量为1 015.56 mm,自重湿陷量为208.28 mm,湿陷情况最严重。

所选研究区域内的场地在各种设计降雨工况中绝大多数已达到湿陷Ⅱ级,而且个别达Ⅲ级,极有可能危及各类构筑物的结构安全,诸如发生地基塌陷等事故。在湿陷性黄土地区进行海绵城市建设时必须将黄土湿陷因素纳入考虑范围内。故建设海绵城市时应结合实际情况,根据所在城市的地形和气候、土壤地质、自然禀赋、城建基础以及城市的基底,开展有针对性的海绵城市建设。

参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [2] 王家鼎,张倬元,李保雄. 黄土自重湿陷变形的脉动液化

机理[J]. 地理科学,1999,19(3):271-276.

- [3] 马越,姬国强,石战航,等. 西咸新区沣西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造[J]. 给水排水,2017,43(3):59-67.
- [4] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下LID措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):45-55.
- [5] 韩松磊. 湿陷性黄土地区海绵城市规划及建设探索—以西安为例[J]. 给水排水,2019,55(1):35-41.
- [6] 柴少波,胡志平,王川,等. 海绵城市雨水入渗对邻近建筑地基的影响[J]. 桂林理工大学学报,2019,39(3):635-642.
- [7] 石书云,王通. 黄土湿陷性系数室内试验分析[J]. 山西建筑,2017,43(27):78-79.
- [8] WANG Jiading, LI Ping, MA Yan, et al. Change in pore-size distribution of collapsible loess due to loading and inundating[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(3): 1081-1094.
- [9] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报,2018,37(3):40-49.
- [10] 中华人民共和国建设部. 湿陷性黄土地区建筑规范: GB 50025-2004[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] 周励,王非,张敏洁. 西咸新区助推大西安[J]. 西部大开发,2010(4):38-40.
- [12] SMITH L S, LIANG Qiuhua. Towards a generalized GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 334-343.
- [13] HOU Jingming, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2013, 257: 126-149.
- [14] 刘菲菲,侯精明,郭凯华,等. 基于全水动力模型的流域雨洪过程数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2018,33(6):778-785.
- [15] 彭远煌. Midas GTS/NX在边坡稳定性分析与评价中的应用[J]. 北方交通,2018(9):80-82.
- [16] 何明. 基于Midas GTS NX软件的基坑支护数值模拟研究[J]. 工程技术研究,2017(10):19-20.
- [17] 高二鹏. 不同植被边坡糙率研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [18] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4):264-267.
- [19] 杨柳悦. 黄土中渗流水运动及其对土体的潜蚀特征研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2014.