

开孔铺面土柱入渗试验及对地表径流削减作用分析

徐向阳,纪桂霞,刘 俊

(河海大学水文水资源及环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 对开孔铺面的土柱入渗试验结论是 在充分供水条件下,下渗强度和下渗量的大小与土壤性质、土壤含水量及淹水深度有关.利用试验结果对典型城市设计暴雨分析表明,开孔铺面对地表径流确有削减作用,但不同的土壤性质、土壤含水量,降雨强度、降雨历时的削减作用有显著的差别.

关键词 土柱;入渗试验;地表径流系数;开孔铺面

中图分类号 TV12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2001)01-0030-04

随着经济的发展,我国城市的数量日益增加,1978 年我国城市总数仅 193 座,而到 1994 年底,已增长至 622 座.城市化进程极大地改变了局地自然地貌,对当地水文特性产生了显著的影响,尤其是城市地区不透水面积和强度的增加,阻碍了雨水下渗,加之过度开采地下水,造成城市地下水位下降、地下水硬化、地面下沉、海潮倒灌和咸水入侵等诸多问题.另一方面,地表径流系数的增大,又给城市排涝造成了压力.特别是那些早期的城建区,由于建筑物和人口密度较大,排水系统不能满足现状排涝要求的矛盾非常突出.而这些地区,排水系统的改造不仅费用过高,而且会对正常的生产和生活造成很大的影响.为了更有效地解决这一问题,目前国外正研究采用一定的方法,将城市不透水铺面改变成透水性路面,以增加雨水下渗量和减小地表径流系数,并成功地进行了多项工程实践,取得良好的经济效益和社会效益.为了探讨这一方法对我国城市的适用性,笔者在实验室内针对不同的土壤和水分条件,就开有孔眼的不透水铺面下渗能力进行土柱试验,并分析了对城市地表径流系数的削减作用.

1 开孔铺面的土柱入渗试验

1.1 土柱入渗试验系统

入渗系统由土柱筒、均质土料和开有孔眼的塑料盖板组成.设内径 37 cm、高 1.5 m 的 1 号和 2 号土柱筒两个,底部设有排水管,用以排除底部出流.土壤选用中砂土和粉土两类,中砂土干密度为 1.651 g/cm^3 ,粉土干密度为 1.405 g/cm^3 ,风干后分别填充于 1,2 号筒内,土层厚度 1.0 m.在土层与排水管之间设置了反滤层,以防止土层受渗透破坏.土层表面覆盖钻有孔眼的塑料板,其直径与土柱内径尺寸相同,用以模拟城市开孔不透水铺面.综合考虑实况路面强度和不影响人行车驶等要求,孔径定为 5 mm,开孔面积比率为 5.6%.

人工降雨系统由人工降雨喷头、供水箱和表层积水控制器组成.人工降雨强度范围为 $0.1 \sim 2.0 \text{ mm/min}$,通过控制供水箱水位来控制降雨强度.积水控制器可控制土壤表层的积水深度.

累积降雨量用精密水表测量,地下水出流量用量筒定时量测.

1.2 试验结果及分析

1.2.1 土壤类型对下渗率的影响

当初始土壤含水量 $w_0 = 0$ 、开孔铺面上积水深度为 1 cm 时,分别测出中砂土和粉土累积下渗数据,绘制曲线如图 1 所示,并由以下公式计算得下渗率随时间的变化曲线 $f(t)$.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

图 2 和图 3 分别描绘了中砂土和粉土的入渗曲线.由图可见,中砂土和粉土下渗率曲线均呈指数衰减形式.与粉土相比,中砂土下渗速率较大,当土壤初始含水量为零时,初始下渗率和稳定下渗率大约为粉土对

应下渗率的 3.5 和 3.0 倍;当土壤初始含水量达持水量时,初始下渗率和稳定下渗率大约为粉土对应下渗率的 3.0 和 2.5 倍.但是,中砂土下渗率随时间衰减则比粉土的快得多.

1.2.2 土壤含水量对下渗的影响

当铺面上积水深度仍为 1 cm、中砂土和粉土初始土壤含水量 w_0 为土壤持水量时,即中砂土初始含水量为 15.6%,粉土初始含水量为 26.9%,经试验推求得下渗率曲线.结果表明,土壤初始含水量对下渗过程影响显著,不仅是初始下渗率较小,而且稳定下渗率也明显降低.这种对稳定下渗率的影响,粉土又明显大于中砂土的情况.

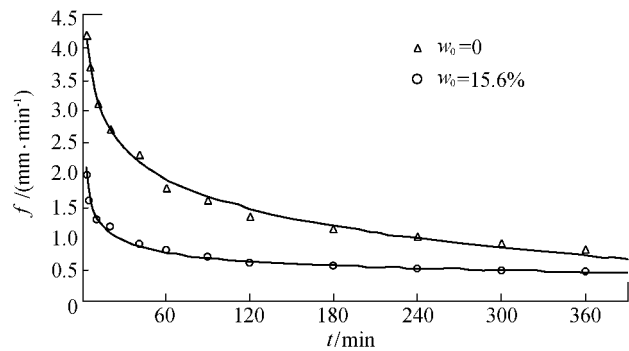


图 2 不同初始含水量的中砂土下渗过程线
Fig.2 Infiltration hydrograph of medium sand soil with different initial moisture

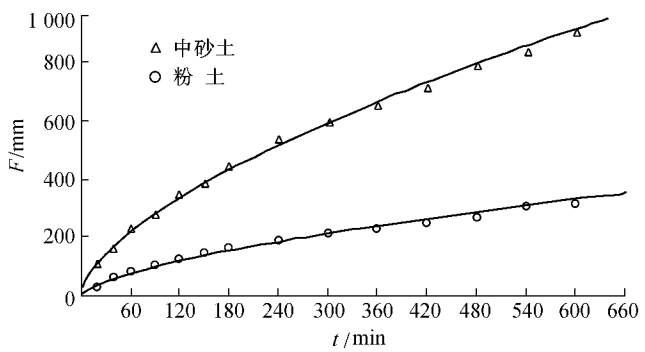


图 1 实测累积下渗曲线 ($w_0=0$)
Fig.1 Cumulating infiltration curve measured

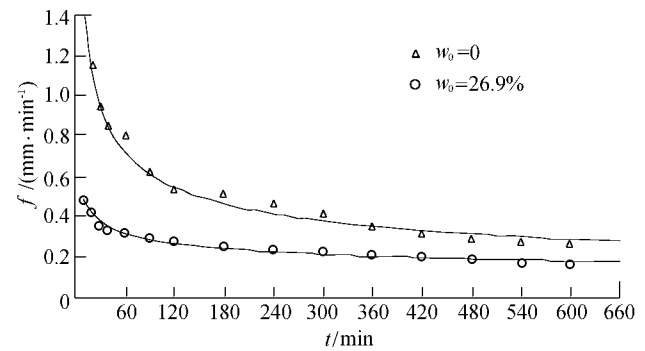


图 3 不同初始含水量的粉土下渗过程线
Fig.3 Infiltration hydrograph of powder soil with different initial moisture

1.2.3 积水深度对下渗的影响

试验结果表明下渗率随铺面上积水深度的增加而加大,但积水深度对稳定下渗率的影响并不显著.当积水深度从 1.0 cm 增加到 11.0 cm 时,稳定下渗率仅增大了 7.0%.因此,开孔铺面上下渗试验表明,对下渗率影响的主要因素首先是土壤的类型,其次是土壤初始含水量.与之比较,地表积水深度是影响下渗的次要因素.上述结果与裸土下渗试验结果的性质类似^[1].

2 开孔铺面对城市地表径流的削减作用

城市中的不透水面积占据了很大比例,如果有可能采用开孔铺面来取代原有的不透水覆盖,则可对城市地表径流产生削减作用,减小地表径流系数.

2.1 典型城市地表径流系数分析

2.1.1 开孔铺面下渗方程

根据对中砂土和粉土的开孔铺面下渗试验数据,采用霍顿方程描述下渗曲线,方程形式为

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$
(2)

式中: f_t —— t 时刻的入渗率,mm/min; f_0 ——初始入渗率,mm/min; f_c ——稳定入渗率,mm/min; k ——入渗衰减指数,1/min.

为了更充分地说明开孔铺面对地表径流的最低削减作用,这里就土壤在雨前处于持水量条件,通过率定得出霍顿下渗方程的参数.结果为 粉土 $f_0=0.330, f_c=0.096, k=-0.0159$,即

$$f_t = 0.096 + 0.234e^{-0.0159t}$$
(3)

中砂土 $f_0=1.705, f_c=0.525, k=-0.0316$,即

$$f_t = 0.525 + 1.18e^{-0.0316t}$$
(4)

2.1.2 典型城市降雨过程

我国排水设计中常用的暴雨强度公式为

$$i = \frac{a_p}{(t + b)^n}$$

式中： i ——降雨历时 t 内平均雨强； a_p, b, n ——参数。

按照 Keifer 和 Chu 提出的芝加哥下水道设计雨型的原理^[2]，可以推求得相应于暴雨强度公式(5)的瞬时雨强公式为

雨峰前
$$I_1 = \frac{a_p [(1 - n) \frac{t_1}{r} + b]}{(\frac{t_1}{r} + b)^{n+1}}$$

雨峰后
$$I_2 = \frac{a_p [(1 - n) \frac{t_2}{1 - r} + b]}{(\frac{t_2}{1 - r} + b)^{n+1}}$$

式中： I_1, I_2 ——雨峰前 t_1 和雨峰后 t_2 时刻的瞬时雨强。为了研究降雨强度和降雨历时对开孔铺面地表径流系数的影响，取雨强较大的南京市和雨强较小的兰州市两个典型城市的暴雨过程进行讨论。两市暴雨公式形式为^[3]：

南京市
$$i = \frac{17.9(1 + 0.671 \lg P)}{(t + 13.3)^{0.8}}$$

兰州市
$$i = \frac{6.826(1 + 0.961 \lg P)}{(t + 8)^{0.8}}$$

将公式(8)和(9)中相应的 a_p, b, c 数值代入公式(6)，(7)，按我国城市常见的雨型分析，取雨峰位置参数 $r = 0.4$ ，则可分别得出南京市和兰州市的瞬时雨强公式。

2.1.3 地表径流系数

如果仅考虑下渗损失，指定历时 t 内降雨量 X 所产生地表径流用下式推求：

$$R = \int_{I \geq f} (I - f) dt$$

在计算过程中，由于雨强可能小于下渗强度，故应根据累积下渗量结合公式(3)和(4)推求实际下渗强度 f ，采用下渗曲线平移法^[4]推求实际产流强度 $(I - f)$ 。据此可计算得地表径流系数

$$\alpha = R / X$$

如果不考虑初损，按照试验条件和试验结果，计算得南京市和兰州市各降雨历时 t 和重现期 P 的地表径流系数，分别见表 1 和表 2。

表 1 南京市地表径流系数计算结果

Tabel 1 Calculated surface runoff coefficients for Nanjing

t /min	粉土				中砂土			
	$P = 1$	$P = 2$	$P = 5$	$P = 10$	$P = 1$	$P = 2$	$P = 5$	$P = 10$
30	0.75	0.82	0.86	0.87	0.46	0.64	0.75	0.79
60	0.68	0.77	0.83	0.85	0.37	0.56	0.67	0.72
90	0.64	0.73	0.79	0.83	0.33	0.50	0.62	0.67
120	0.60	0.70	0.76	0.82	0.30	0.46	0.58	0.64

表 2 兰州市地表径流系数计算结果

Tabel 2 Calculated surface runoff coefficients for Langzhou

t /min	粉土				中砂土			
	$P = 1$	$P = 2$	$P = 5$	$P = 10$	$P = 1$	$P = 2$	$P = 5$	$P = 10$
30	0.43	0.65	0.78	0.82	0.10	0.30	0.53	0.63
60	0.34	0.57	0.71	0.76	0.08	0.24	0.43	0.54
90	0.31	0.51	0.66	0.72	0.07	0.22	0.39	0.48
120	0.29	0.48	0.63	0.69	0.07	0.20	0.36	0.44

2.2 对城市地表径流削减作用分析

根据表 1 和表 2,对南京市和兰州市地表径流系数计算结果分析,表明采用开孔铺面代替城市不透水铺面对地表径流具有明显的削减作用.但不同的条件则削减的程度有所差别的,其特点是:(a)暴雨重现期越小,下渗量占降雨量的比例越大,地表径流系数越小,对地表径流削减的程度越显著;(b)降雨历时越长,地表径流系数越小,地表径流削减比例越大;(c)砂性土壤对地表径流削减能力较强;(d)雨强度较小的城市地表径流削减比例较大;(e)由于下渗强度与土壤含水量成反比关系,若雨前土壤含水量低于持水量,则开孔铺面对城市地表径流的削减作用更为显著.

从以上几个特点说明,采用开孔铺面削减地表径流特别适用于以下几类情况:(a)降雨强度较小和地下水位较低的城市;(b)属砂性土壤地区的城市;(c)规划或设计重现期较小的排水系统;(d)设计排涝历时较长或排涝面积较大的区域.

3 结 论

在实验室条件下,对开孔铺面进行的土柱下渗试验表明,下渗率的大小与土壤砂性程度和积水深度成正比,与土壤含水量成反比关系.利用试验结果对南京市和兰州市两个典型城市设计暴雨条件下对地表径流的削减分析表明,除受土壤性质和土壤含水量的影响外,地表径流系数显著地与降雨强度成正比而与设计降雨历时成反比.因此,对于那些现有排水系统超载严重,但进行管网改建非常困难或代价过高,或为了降低新建排水系统造价的情况,通过可行性分析后,采用开孔铺面取代完全不透水铺面是减少城市地面淹水频次和涝灾程度的良好途径之一.

参考文献：

[1] 沈晋,王文焰,沈冰. 动力水文实验研究[M]. 西安 陕西科技出版社,1991. 121 ~ 170.
[2] Keifer C J,Chu H H. Synthetic storm pattern for drainage design [J]. J Hydraul Div,1957, 83(HY4) :34 ~ 45.
[3] 重庆建筑工程学院. 排水工程[M]. 北京 中国建筑工业出版社,1987. 65 ~ 77.
[4] Kioler D F. Urban streamwater hydrology [M]. Washington D C :American Geophysical Union,1982. 41 ~ 44.

Infiltration Test of Soil Column with Perforated Pavement
and Function of Reducing Surface Flow Rate

XU Xiang-yang,JI Gui-xia, LIU Jun

(College of Water Resource and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098, China)

Abstract :The results of stormwater infiltration test of soil column with perforated pavement expressing the infiltration intensity and capacity are affected by soil characteristics , soil moisture and water depth on the pavement . The analysis of design storm on typical cities indicates that perforated pavement reduces the surface flow rate of stormwater and the ratio of reduction depends on soil characteristics , soil moisture ,and storm intensity and duration .

Key words :soil column ;infiltration test ;surface flow coefficient ;perforated pavement