

毛细水上升高度综合试验研究

董 斌¹, 张喜发², 李 欣², 张冬青³

(1. 山东电力工程咨询院, 山东 济南 250013; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春 130021)

摘 要: 通过对 12 种不同粗细土料进行室内竖管法毛细水上升高度试验, 得到毛细水上升高度与时间关系曲线, 并分析了影响因素和变化规律。粗粒土毛细水上升高度与时间过程可用对数坐标下二次多项式回归方程进行模拟和预测, 方程参量与反映土的颗粒组成和装填密实程度大小的物理指标密切相关。给出了各种粗细粒土毛细水上升稳定高度数据。对粗粒土建立了毛细水上升最大高度与其物理指标 (有效粒径 d_{10} 和孔隙率 n) 间的实用回归方程式。还将试验数据与以往常用的估计粗粒土毛细水上升最大高度的海森等公式进行了对比, 指出后者之缺陷和不足。

关键词: 竖管法; 粗粒土; 细粒土; 毛细水上升高度; 压实度

中图分类号: TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)10-1569-06

作者简介: 董 斌(1983-)男, 山东潍坊人, 2008 年在长春吉林大学获得地质工程专业硕士学位, 主要从事水文地质与工程地质、岩土工程等方面的研究。E-mail: qitian_12345@163.com。

Comprehensive tests on rising height of capillary water

DONG Bin¹, ZHANG Xi-fa², LI Xin², ZHANG Dong-qing³

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute, Jinan 250013, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. Bureau of High-grade Highway Construction of Jilin Province, Changchun 130021, China)

Abstract: According to the comprehensive tests on the rising height of capillary water for twelve kinds of different coarse grained soil and fine grained soil by use of the method of standpipe, the relationship between the rising height of capillary water and time was obtained, and the influencing factors and rules were analyzed. The relationship between the rising height of capillary water of coarse grained soil and time could be drawn by the double-unit regression equation in the logarithmic coordinate. The parameters were related with composition of grain and degree of compaction. The data of the steady rising height of capillary water were obtained, and the regression equation of coarse grained soil on steady height and physical indexes (effective grain d_{10} and porosity n) was found. Compared with Hazen's and other expressions that could estimate the steady height of capillary water of coarse grained soil, the proposed method was satisfactory, and the defects of the latter were pointed out.

Key words: method of standpipe; coarse grained soil; fine grained soil; rising height of capillary water; degree of compaction

0 引 言

季节性冻土区路基的冻害一直是困扰我国北方地区公路建设的一个重要问题。土中水分的迁移对路基冻害的产生有着实质性的影响。就水分迁移研究方面而言, 虽然国内外都曾开展了许多研究, 但主要是集中在农田水利部门和土壤盐渍化地区, 在季冻区的公路特别是高速公路的水分迁移研究做的还很少^[1]。在此情况下, 开展了路基水分迁移的室内竖管法模拟试验研究, 以便揭示规律, 积累经验, 为路基防冻设计、施工和维护提供依据和资料。试验准备工作从 2001 年下半年开始, 2002 年 1 月 18 日支起第一批立管, 先后分 4 批支起竖管 37 根。其中细粒土试验各项准备

工作从 2001 年下半年开始, 历时 4 a; 粗粒土试验从 2003 年下半年开始, 历时两年多。竖管毛细水上升都已稳定。

1 竖管法毛细水上升高度试验概况

1.1 竖管法试验原理

竖管法试验原理是基于毛细水作用机理。由固、水、气三相构成的多孔均质颗粒化结构土壤中, 有许多大小、杂乱的空隙, 这些空隙即水分运移通道和滞留的场所。固相基质的矿物组成、化学成分、颗粒大小、形状、

级配、随机排列、组合决定着这些空隙的大小形状、联通性、毛细管弯曲度等空间分布特征。这些也是决定毛细水上升高度的决定性因素。土柱可以被概化为具有统计分布规律的平行毛管束模型。在统计毛管束模型中,水分的横向分配将依毛细力、吸附力、重力的综合作用按毛管的统计分布自毛细力大的小空隙依次向毛细力大的大空隙进行,最终形成小空隙充水(微观饱和)。水土接触后彼此间产生的毛细力或吸附力使单位重水体能够具有一种能量,做功后(忽略摩擦损失)转化为等量重力势能,表现为毛细水上升高度^[2]。从而最终达到竖管法试验的效果。

1.2 试验土料性质

细粒土试验土料编号为#1, #2, #3, #4, #7, 粗粒土试验土料编号为#5, #6, #8, #8-A, #8-C, #12, #12-A, 均按公路部门规范要求进行液塑限、颗分、比重和重型击实等基本物理指标试验^[3], 其结果见表 1, 2。

1.3 试验设备^[3]

毛细管试验仪包括试验架、有机玻璃试验管、有机玻璃盛水筒、特制挂簧及挂绳等。有机玻璃管内径 4.5 cm, 壁厚 5 mm 左右, 每 10 cm 开一个直径 10 mm 小洞, 洞口配有能拧紧的有机玻璃小塞, 下端用丝扣与铝制底座相连, 距零点 1 cm 处开一排排气小孔。底座上配有橡皮垫圈和铜丝网。两根管间用外接头连。用特制弹簧保证盛水下降时水面高度始终保持不变。

1.4 试验方法

严格按照文献[3]要求进行试验, 定期测记毛细水上升高度, 直至上升稳定为止。

粗粒土按不同压实度共装配试验竖管 19 根, 细粒土风干土料共装配试验竖管 18 根。其中多数是同压实度下的平行试验。

2 毛细水上升高度与时间关系曲线

(1) 粗粒土

粗粒土毛细水上升高度与时间关系曲线比较有规律, 和土料粗细、含泥量多少和装料时控制压实度大小有密切关系。

图 1, 2 分别是#5 粉砂和#6 细砂的毛细水上升高度与时间关系曲线, 土料编号后连接的数字为土样竖管编码。可以看出, 它们的上升高度和上升速度都随压密度的增加而增加, 颗粒细的#5 粉砂上升高度比#6 细砂要大的多。

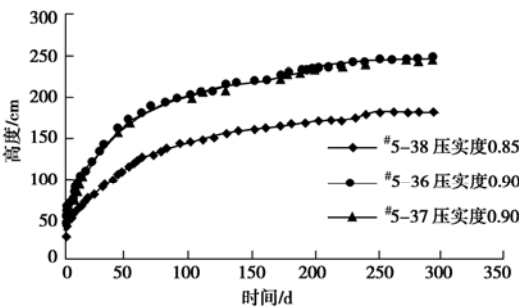


图 1 #5 粉砂毛细水上升高度与时间关系曲线
Fig. 1 The relationship between the rising height of capillary water and the time for the silty sand #5

表 1 细粒土基本物理指标

Table 1 Physical indexes of the fine grained soil

土料 编号	γ_{dmax} ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	w_p /%	w_L /%	I_p	粒度成分/%							
					2~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.075 mm	0.075~ 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.002 mm	<0.002 mm
#1	1.85	21.6	36.3	14.7	1.05	3.24	2.12	29.48	51.94	8.89	3.28 (<0.005)	—
#2	1.87	22.2	40.3	18.1	0.28	0.41	0.62	18.75	47.38	13.82	13.82	4.92
#3	1.83	26.3	52.7	26.4	0.21	0.34	0.64	11.86	44.46	17.78	16.8	7.91
#4	1.95	18.8	28.1	9.24	—	9.05	24.5	27.24	34.82	3.06	1.33 (<0.005)	—
#7	1.91	33.5	20.7	12.8	1.85	9.04	14.41	18.75	42.38	9.00	4.87 (<0.005)	—

注: #1 为含石灰低液限黏土, #2 为低液限黏土, #3 为高液限黏土, #7 为低液限黏土。

表 2 粗粒土基本物理指标

Table 2 Physical indexes of the coarse grained soil

土料 编号	γ_{dmax} ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粒度成分/%								
		10~ 5 mm	5~ 2 mm	2~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.075 mm	0.075 ~0.05 mm	0.05 ~0.01 mm	0.01 ~0.005 mm	<0.005 mm
#5	2.030			0.9800	27.870	39.190	15.660	13.970	1.850	0.480
#6	1.890		0.140	5.9200	41.740	38.650	5.420	7.180	0.810	0.140
#8	1.800	1.876	5.960	17.648	61.242	11.170	0.400	1.010	0.295	0.399
#8-A	2.095	1.440	4.570	13.520	46.910	8.560	4.750	12.000	3.500	4.750
#8-C	1.890	1.720	5.480	16.220	56.310	10.270	1.900	4.800	1.400	1.900
#12	1.760	1.260	11.700	54.990	23.630	5.740	0.510	1.290	0.374	0.506
#12-A	1.880	1.160	10.820	50.850	21.850	5.320	1.900	4.800	1.400	1.900

注: #5 为粉砂, #6 为多泥细砂, #8 为中砂, #8-A 为含泥中砂 (c=25), #8-C 为含泥中砂 (c=10), #12 为粗砂, #12-A 为含泥粗砂 (c=10)。

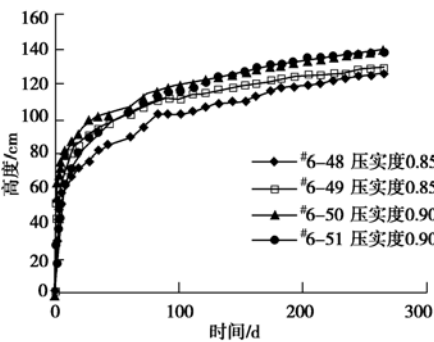


图 2 #6 细砂毛细水上升高度与时间关系曲线

Fig. 2 The relationship between the rising height of capillary water and the time for the fine sand #6

中砂类土料的毛细水上升高度与时间关系曲线汇总于图 3 中。可见中砂类土的毛细水上升高度随含泥量和压实度增加而变大。这是由于增加含泥量和压实度更易于形成有利于毛细水上升的细小孔隙管道的缘故。

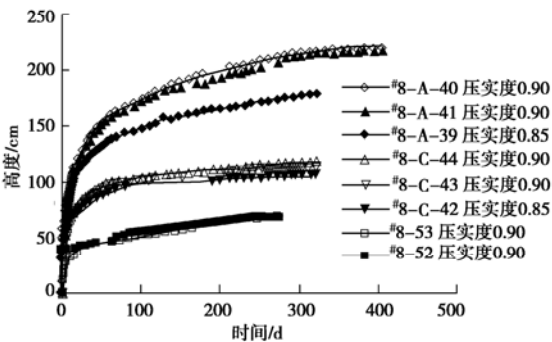


图 3 各种中砂类土料毛细水上升高度与时间关系曲线

Fig. 3 The relationship between the rising height of capillary water and the time for various kinds of medium sand

粗砂类土料的毛细水上升高度与时间关系曲线如图 4 示。可明显看出含泥量对毛细水上升高度的影响。

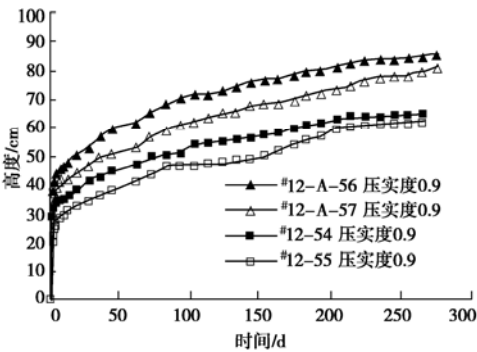


图 4 粗砂土毛细水上升高度与时间关系曲线

Fig. 4 The relationship between the rising height of capillary water and the time for the coarse sand

总之：①对粗粒土，毛细上升高度随颗粒变细（可用平均粒径衡量）而增加；②对同类土料，毛细上升随含泥量增多而变大；③对同种土料，毛细上升高度随压实度增大而增加。

(2) 细粒土

细粒土的情况则比较复杂，随土料塑性大小而变。图 5 显示 #4 低液限粉土各竖管毛细水上升高度与时间关系，可见该土遵循粗粒土规律，即毛细水上升高度随压密度增加而增加。比较图 5 和图 1 还可看出，粉土上升高度比粉砂大，这是因为其颗粒更细之故。

#3 高液限黏土的情况则相反。这种土随着压实度的增加，其毛细水的上升速度明显降低，并且上升高度也显著减小，如图 6 所示。这种现象可合理解释为：压实度的增加，使得毛细孔隙变小，同时由于 #3 是高液限黏土，土中细粒含量高，塑性指数大，土粒的结合水可形成较厚的结合水膜，结合水膜重合比较多，使得原本变小的部分孔隙被结合水阻断，形成使水分不能流动的死端孔隙，没有阻断的孔隙也变得更加细小，水分迁移迂回度增加，毛细上升阻力变得更大，上升速度变得更慢，高度更小^[2, 4]。

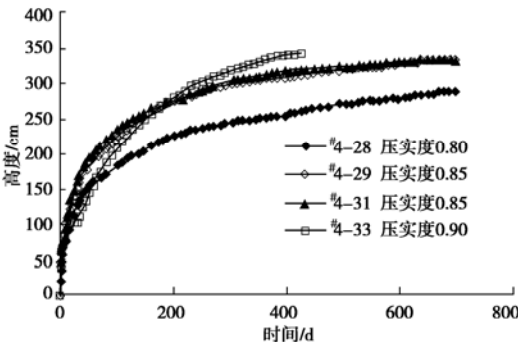


图 5 #4 粉土毛细水上升高度与时间关系曲线

Fig. 5 The relationship between the rising height of capillary water and the time for the silt #4

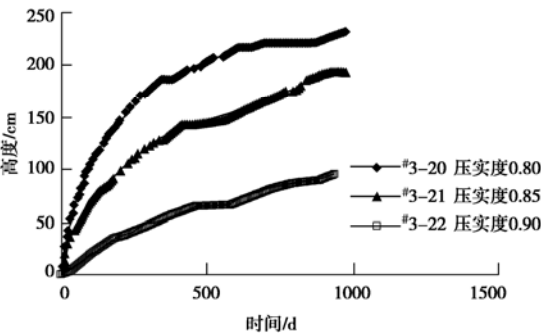


图 6 #3 高液限黏土毛细水上升高度与时间关系曲线

Fig. 6 The relationship between the rising height of capillary water and the time for the high liquid limit clay #3

3 粗粒土毛细水上升高度的预测

经分析发现,将时间和所对应的毛细水上升高度取对数后用二阶(既能保证预测精度又利于简化计算)多项式进行拟合,所得到的预测曲线精度最高。图 7 是密实度为 0.85 的#8-A-39 竖管根据拟合方程绘制的时间-上升高度预测曲线。

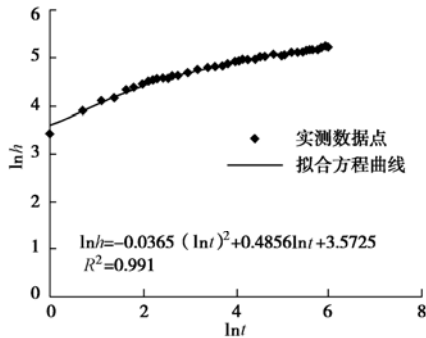


图 7 #8-A-39 竖管(压实度 0.85) $\ln t$ - $\ln h$ 关系曲线
Fig. 7 The relationship between $\ln t$ and $\ln h$ of the standpipe
#8-A-39 (degree of compaction=0.85)

对压实度为 0.85, 0.9 的#5, #6, #8, #8-A, #8-C, #12, #12-A 竖管资料进行数据整理,将 19 组有效观测数据都绘制出时间-上升高度预测曲线, $\ln t \sim \ln h$ 回归方程皆为类似图 7 的 $\ln h=a(\ln t)^2+b\ln t+c$ 形式,参数 a , b , c 和复相关系数 R^2 如表 3 所示。

表 3 $\ln t$ - $\ln h$ 回归方程参数

Table 3 The parameters in the regression equation in the logarithmic coordinate					
土样号	密实度	a	b	c	R^2
#5	0.90	-0.0233	0.4658	3.6544	0.9948
	0.90	-0.0315	0.5609	3.3799	0.9953
	0.85	-0.0015	0.3383	3.4075	0.9912
#6	0.90	-0.0018	0.1656	4.0604	0.9978
	0.90	-0.0542	0.6526	2.9349	0.9934
	0.85	-0.0115	0.2948	3.5301	0.9925
	0.85	-0.0126	0.2613	3.7889	0.9989
#8	0.90	-0.0152	0.3341	2.8059	0.9782
	0.90	0.0286	-0.0598	3.6846	0.9898
#8-A	0.90	-0.0752	0.8517	2.9211	0.9608
	0.90	-0.0469	0.6188	3.3284	0.9950
	0.85	-0.0365	0.4856	3.5725	0.9910
#8-C	0.90	-0.0422	0.4872	3.3506	0.9309
	0.90	-0.046	0.4864	3.4326	0.9142
	0.85	-0.0135	0.2365	3.7734	0.9928

参数 a , b , c 反映了竖管中毛细水上升高度与时间的关系,是与土的物理指标密切相关的参数。对 7 种粗粒土,将表 3 中参数 a , b , c 与土料的各种物理指标进行多重相关性分析,其相关系数如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,参数 a , b , c 与土的孔隙率、干重度、特征粒径有较大的相关性。在土体中,孔隙率决定了土样孔隙的多少,反映土体中孔隙的连通情况;干重度反映了土粒排列的紧密程度、土粒矿物的密度等;特征粒径直接反映了土的粒度成分特性—这些都是影响粗粒土毛细水上升高度最重要的因素。因此用这些物理指标来反映土体中毛细水上升高度是比较合理的。

运用统计学中的逐步多元线性回归方法^[5]对参数 a , b , c 与土样各指标进行逐步多元线性回归分析,最后得回归方程如下:

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.544n - 0.184d_{30} + 0.112d_{60} - 0.215, \\ b &= 0.7\gamma_d + 1.25d_{30} - 0.728d_{60} - 2.817, \\ c &= 0.202C_c - 0.926d_{50} + 2.804. \end{aligned} \right\} (1)$$

将上面的方程组与对数形式的二次多项式 $\ln h=a(\ln t)^2+b\ln t+c$ 联立,便建立起一套粗粒土毛细水上升高度的预测公式。

4 毛细水上升稳定高度经验数据和公式

4.1 竖管法试验经验数据

本课题共完成 12 种土料有机玻璃竖管试验 37 个,其毛细水上升稳定高度数据见表 5。

4.2 粗粒土毛细水上升高度经验关系式

由第 3 节毛细水上升高度与时间关系曲线的论述和表 5 试验数据可知,粗粒土毛细水上升高度与土质条件和装填密实程度关系密切,因此可以考虑建立毛细水上升高度与砂土基本物理指标间的相关关系式。

粗粒土的物性指标有许多种,可参照海森公式选用有效粒径 d_{10} 和孔隙率 n ^[6]

$$h_c = \frac{C(1-n)}{d_{10}n} \quad (2)$$

式中 h_c 为毛细水上升高度 (m); n 为土的孔隙率; d_{10} 为有效粒径 (m); C 为系数,与土粒形状及表面洁净情况有关, $C=1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ (m²)。

试验土料有效粒径 d_{10} 数据见表 6,孔隙率数据可根据土料比重 G_s 和竖管试验控制干密度 γ_d 按土的体积-重量关系按有关公式计算得到。

表 4 粗粒土参数 a , b , c 与各物理指标相关关系

Table 4 The relationship between the parameters and the physical indexes

参数	孔隙率 n	干重度 γ_d	比表面积 s	不均匀系数 C_u	曲率 C_c	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}
a	0.671070	-0.667690	-0.614240	-0.397370	-0.106840	-0.106840	0.499062	0.535912	0.556477
b	-0.745880	0.761236	0.718729	0.432022	-0.062270	-0.626280	-0.589710	-0.575370	-0.578160
c	0.257949	-0.174090	0.047165	-0.0847250	0.427335	-0.378750	-0.247110	-0.245210	-0.231580

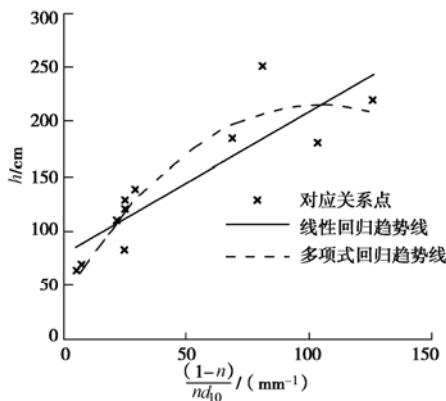


图 8 粗粒土毛细上升高度与物理指标间关系图

Fig. 8 The relationship between the rising height of capillary water and the physical indexes of the coarse grained soil

表 5 毛细水上升稳定高度数据表

Table 5 The data of the steady rising height of capillary water

土料编号及名称	土样管编号	压实度 K_d	上升最大高度/cm
#1 含石灰低液限黏土	#1-3	0.80	289.0
	#1-1	0.85	281.6
	#1-4	0.90	287.5
	#1-6	0.90	280.0
#2 低液限黏土	#2-14	0.80	357.0
	#2-15	0.85	349.5
	#2-18	0.90	308.5
#3 高液限黏土	#3-20	0.80	230.0
	#3-21	0.85	195.0
	#3-22	0.90	98.0
#4 低液限粉土	#4-27	0.80	295.3
	#4-28	0.80	288.0
	#4-30	0.80	298.0
	#4-29	0.85	334.5
	#4-31	0.85	334.0
	#4-33	0.90	342.2
#5 粉砂	#5-38	0.85	184.2
	#5-36	0.90	249.0
	#5-37	0.90	248.0
#6 细砂	#6-48	0.85	126.0
	#6-49	0.85	129.5
	#6-50	0.90	139.5
	#6-51	0.90	137.0
#7 低液限黏土	#7-45	0.80	252.5
	#7-47	0.90	368.5
#8 中砂	#8-52	0.90	69.0
	#8-53	0.90	69.5
#8-A 含泥中砂 ($c=25\%$)	#8-A-39	0.85	180.5
	#8-A-40	0.90	220.0
	#8-A-41	0.90	218.5
#8-C 含泥中砂 ($c=10\%$)	#8-C-42	0.85	111.0
	#8-C-43	0.90	115.0
	#8-C-44	0.90	121.5
12#粗砂	#12-54	0.90	65.0
	#12-55	0.90	62.0
#12-A 含泥粗砂 ($c=10\%$)	#12-A-56	0.90	86.0
	#12-A-57	0.90	81.0

一元线性回归方程:

$$h = 1.3183 \frac{1-n}{d_{10}n} + 78.636 ,$$
$$R^2 = 0.7738 ,$$
$$n = 11 ,$$
$$F = 30.79 > F_{0.01}(1,9) = 10.56 ;$$

(3)

二次多项式回归方程:

$$h = -0.0164 \left(\frac{1-n}{d_{10}n} \right)^2 + 3.3701 \left(\frac{1-n}{d_{10}n} \right) + 43.119 ,$$
$$R^2 = 0.8776 ,$$
$$n = 11 ,$$
$$F = 64.53 > F_{0.01}(2,8) = 8.45 .$$

(4)

表 6 粗粒土料特征粒径指标

Table 6 The characteristic grain size of the coarse grained soil

土料编号	特征粒径/mm			
	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}
#5	0.028	0.071	0.145	0.190
#6	0.064	0.185	0.238	0.284
#8	0.238	0.317	0.376	0.411
#8-A	0.021	0.160	0.280	0.310
#8-C	0.075	0.300	0.362	0.396
#12	0.273	0.478	0.769	0.992
#12-A	0.075	0.418	0.711	0.900

4.3 试验结果与海森等公式比较

Polubarinova-Kochina 取式 (2) 中系数 C 为定值, 变为下式^[7]:

$$h_c = \frac{0.45(1-n)}{d_{10}n} .$$

(5)

试验结果与按式 (2) 和式 (5) 计算结果的比较列于表 7 中。由表 7 可看出, 按试验结果反算得: 海森公式系数 $C = 0.17 \sim 1.10 \text{ (cm}^2\text{)}$, 变化太大, 实际很难选择; Polubarinova-Kochina 公式过于简单化, 计算结果忽高忽低, 极不可靠。而本文基于多种土料试验得出的回归方程式 (3) 和式 (4) 相关程度较高, 可信度大, 比式 (2) 和 (5) 要优越得多, 可供生产参考使用。

5 结 语

(1) 无论粗粒土还是细粒土, 毛细水在开始供水

表 7 粗粒土毛细水高度试验值与计算值比较

Table 7 The comparison between the test and the calculated values of the rising height of capillary water of the coarse grained soil

土料编号	密实度 K_d	孔隙率 n	有效粒径 d_{10}/mm	复合因子 $(1-n)/d_{10}n$ $/(\text{mm}^{-1})$	试验稳定高度 h/cm	反算系数 C/cm^2	按式 (5) 计算高度 h/cm
#5	0.85	0.344	0.028	68.11	184.2	0.27	306.5
	0.90	0.305	0.028	81.38	249.5	0.31	366.2
#6	0.85	0.387	0.064	24.75	127.8	0.52	111.4
	0.90	0.351	0.064	28.89	138.3	0.48	130.0
#8	0.90	0.374	0.238	7.03	69.3	0.98	31.6
#8-A	0.85	0.316	0.021	103.07	181.0	0.18	463.8
	0.90	0.275	0.021	125.5	219.3	0.17	564.8
#8-C	0.85	0.381	0.075	21.66	111.0	0.51	97.5
	0.90	0.344	0.075	25.43	118.3	0.47	114.4
#12	0.90	0.388	0.273	5.78	63.5	1.10	26.0
#12-A	0.90	0.348	0.075	24.98	83.8	0.34	112.4

初期上升速度都是最快的，随着时间增长，上升速度越来越慢，即单位时间内水分上升高度的变化是随着时间增长而减小的。

(2) 粗粒土毛细水上升高度随颗粒变细、含泥量增多和压实度增大而增加。

(3) 细粒土毛细水上升高度情况比较复杂，随土料塑性大小而变。低液限粉土遵循粗粒土规律，即毛细上升高度随压实度增大而增加；高液限黏土情况则相反，毛细上升高度随压实度增大而减小。

(4) 粗粒土毛细水上升高度与时间过程可用对数坐标下二次多项式回归方程进行模拟，其参量与反映土的颗粒组成和装填密实程度大小的物理指标密切相关。

(5) 以往实践中估计粗粒土毛细水上升高度常用的海森公式中的经验系数变化太大，实际很难选择；Polubarinova-Kochina 公式过于简单化，计算结果忽高忽低，极不可靠。而本文基于多种土料试验得出的回归方程式相关程度高，可信度大，可供生产中估计毛细上升最大高度时参考使用。

参考文献:

[1] 黄小铭. 我国寒区道路工程中冻土问题研究的回顾[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 344 - 348. (HUANG Xiao-ming. Review about the research on permafrost problems of road engineering in cold region in China[J]. Journal of Glaciology

and Geocryology, 1988, 10(3): 344 - 348. (in Chinese))

[2] 希勒尔 D. 土壤和水——物理原理和过程[M]. 北京: 农业出版社, 1981: 34 - 35, 109 - 136. (HILLEL D. Soil and water——physical principle and processes[M]. Beijing: Agriculture Press, 1981: 34-35, 109 - 136. (in Chinese))

[3] JTJ 051—93 公路土工试验规程[S]. (JTJ 051—93 Method for highway engineering[S]. (in Chinese))

[4] 布达戈夫斯基 А И. 水向土中入渗[M]. 北京: 水利出版社, 1957, 8: 22 - 82. (BUDAKOVSKY A И. Permeation of water to soil[M]. Beijing: Water Power Press, 1957, 8: 22 - 82. (in Chinese))

[5] 中国科学院数学研究所数理统计组. 回归分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1974: 111 - 128. (Mathematical Statistics Group of Institute of Mathematics of the Chinese Academy of Sciences. Method of regression analysis[M]. Beijing: Science Press, 1974: 111 - 128. (in Chinese))

[6] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 第三版. 北京: 人民交通出版社, 2001, 3: 37 - 38. (GAO Da-zhao, YUAN Ju-yun. Soil tectonics and soil mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2001, 3: 37 - 38. (in Chinese))

[7] 贝尔 J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983, 8: 377 - 378. (BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. LI Jing-sheng, CHEN Chong-xi, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983, 8: 377 - 378. (in Chinese))