

非饱和黄土含水量与基质吸力的关系*

党进谦 李靖

(西北农业大学水利与建筑工程学院·陕西杨陵·712100)

摘要 以陕西关中地区马兰黄土为对象,通过对试验测定结果的分析,得到非饱和黄土(Q_3)的含水量与基质吸力相关关系的数学模式,分析表明:该数学模式能较好地表征马兰黄土在较大的基质吸力变化范围内含水量与基质吸力的关系

关键词 非饱和黄土 含水量 基质吸力

Study on Correlation between Water Content and Matrix Suction of Unsaturated Loess

Dang Jinqian Li Jing

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwestern Agricultural University, 712100, Yangling, Shaanxi)

Abstract In this paper, the malan loess on Guanzhong area in Shaanxi province has been studied and a mathematic model of correlation between water content and matrix suction of unsaturated loess has been obtained through the analyses to the measured results of experiment. Analyses show that the mathematic model can excellently demonstrate the relation between water content and matrix suction of Malan loess in a large varying range of matrix suction.

Key words unsaturated loess; water content; matrix suction

西北地区的马兰黄土,在干旱半干旱及地下水深埋条件下,常处于非饱和状态。非饱和土的工程性质较之饱和土要复杂得多,深刻认识非饱和黄土的工程性质,不仅与这个地区的工程建设密切相关,而且对控制水土流失,治理好黄河也有重要意义。研究非饱和黄土的工程性质须考虑基质吸力的作用,这已成为岩土工程界专家学者的共识。非饱和土基质吸力的大小,主要取决于土壤含水量,关于非饱和土的含水量与基质吸力的相关关系,目前大量的研究成果是在土壤学领域中得到的,其常用关系式为 $s = a\theta^b$,该关系式没有反映基质吸力的组成情况。文献[4]研究得到非饱和黄土的含水量与基质吸力的相关关系为 $w = a(s^{-b} + s^c)$ 。本文以压力板法量测非饱和黄土的基质吸力,根据试验测定资料分析得到 $0.1 \times 10^3 \sim 15 \times 10^5 \text{Pa}$ 范围内陕西关中地区非饱和黄土的含水量与基质吸力相关关系的数学模式为:

$$w = as^{-b} + cs^{-d}$$

该数学模式从基质吸力组成的微观机理出发,定量地描述了吸着含水量及毛管含水量随基质吸力的变化过程。

1 土壤吸力

1.1 土壤水的形态

分布于土壤骨架孔隙中的水,按其物理化学性质可分为吸着水、毛管水和重力水等几类^[1]。

吸着水由土粒和水的物理化学相互作用所吸持,可分为强吸着水和弱吸着水两部分。强吸着水受土壤颗粒的吸引力,里层可达 $1 \times 10^9 \sim 2 \times 10^9 \text{Pa}$,外层也有 $31 \times 10^5 \text{Pa}$;弱吸着水受土壤颗粒的吸引力,最外层约 $6.5 \times 10^5 \text{Pa}$ ^[1]。

毛管水依靠水—气界面弯液面的表面张力而被吸持于土壤孔隙中。毛管水的性质和自由水相同,当毛管水达到最大值时,毛管力约为 $0.1 \times 10^5 \sim 0.3 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

重力水与土壤颗粒没有直接的相互作用,其性质和自由水没有区别。

从上述土壤水受土壤颗粒吸引力的情况看,毛管力起作用的上限约 $6.5 \times 10^5 \text{Pa}$,下限约 $0.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

1.2 土壤的基质吸力

土壤水,如同自然界的其它物体一样,具有不同形式、不同数量的能。动能和势能是土壤水能量的两种主要形式。由于水在土中流速很小,所以对土壤水的动能可忽略不计。因之,势能就成为土壤水基于其在重力场中的位置所具有的主要能量。

由于土壤水承受着不同的力,如土粒对水的吸引力,溶解盐离子的作用力,重力以及外部气压力等,土壤水的总势能通常被定义为:由不同因子所产生的势能分量之和,即:

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_s + \psi_t \quad (1)$$

式中: ψ ——总势能; $\psi_g, \psi_p, \psi_m, \psi_s, \psi_t$ ——分别为重力势、压力势、基质势、溶质势和温度势。

对于非饱和土壤在不考虑气压势的情况下,压力势 $\psi_p = 0$;土壤一般不存在半透膜,土壤水溶质的存在并不显著的影响土壤水分的流动,因此可忽略溶质势的影响,即 $\psi_s = 0$;土壤温度的分布和变化对土壤水分运动的影响是多方面的,有时远超过了温度势本身的作用,因此在分析土壤水势时,温度势的作用常被忽略,即 $\psi_t = 0$;重力势决定于所论土壤水的高度或垂直位置,若选取土壤水的高程作为参考面,则 $\psi_g = 0$;因此,在非饱和土力学中,一般认为 $\psi = \psi_m$ 。 ψ 的负值即为土壤吸力, ψ_m 的负值为土的基质吸力,用 s 表示^[3]。

2 基质吸力的量测

在陕西关中地区马兰黄土层面上,由西向东以梅花状布置 14 个取土点,各取土点的取土深度均为 4~5m。这 14 个取土点分别位于千阳、彬县、铜川、白水、合阳、岐山、淳化、临潼、大荔、宝鸡、杨陵、咸阳、渭南、潼关等县(区)。用压力板法分别量测这 14 个取土点土样的基质吸力。

压力板法可获得大至 $15 \times 10^5 \text{Pa}$ 的压力。该法所加压力的大小,取决于多孔板(陶土板或薄膜)的耐压能力(即在工作压力下透水不透气的的能力)和压力室的安全工作压力。

压力板法量测吸力的原理是给压力室施加一定的压力,压力室内被水饱和的试样受到一定的压力而排水。当排水停止时,试样中的总土水势应与多孔板下的自由水的总水势相等。自由水所受的压力为大气压(当出水口与多孔板在同一高度时),所以压力势 $\psi_p = 0$,基质势也为零,即 $\psi_m = 0$ 。考虑土样中的水与自由水的溶质势 ψ_s 、温度势 ψ_t 和重力势 ψ_g 均相等,所以试样的基质势与压力势之和等于自由水的总水势,即等于零,而试样的压力势即为所施加的压力。因此,试样的基质势等于压力室内压力的负值,即压力室的压力等于基质吸力 s 。

基质吸力的量测范围为 $0.1 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{Pa}$, 分 8 个压力水平进行: $0.25 \times 10^5, 0.5 \times 10^5, 1 \times 10^5, 3 \times 10^5, 5 \times 10^5, 7 \times 10^5, 10 \times 10^5, 15 \times 10^5 \text{Pa}$ 。每个测点同时量测两个试样, 分别量测两次, 共 4 个重复, 取其算术平均值。用连续称重法计算含水量:

$$w_i = \left[\frac{M_i}{M_n} (1 + w_n) - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: w_i ——某一吸力水平下的含水量(%); w_n ——最终吸力水平下的含水量(%); M_i ——某一吸力水平下的湿土质量(g); M_n ——最终吸力水平下的湿土质量(g)。

文献[4]量测得到各取土点土样的基质吸力与对应含水量见表 1。

表 1 各土样基质吸力与对应含水量 %

取土点	基质吸力 (10^5Pa)							
	0.25	0.5	1	3	5	7	10	15
千阳	25.88	20.42	18.15	15.19	14.57	14.01	13.88	13.72
彬县	27.48	20.91	18.31	14.65	12.67	11.96	11.85	11.74
铜川	28.19	21.15	18.91	15.18	13.32	12.03	11.94	11.86
白水	24.57	20.54	18.66	16.55	14.86	14.41	14.30	14.18
合阳	25.41	20.94	17.95	15.35	12.79	12.40	12.35	12.26
岐山	26.10	21.03	18.85	15.62	13.94	13.82	12.65	12.42
淳化	25.33	20.71	18.58	15.77	14.36	13.29	13.20	13.11
临潼	25.78	20.95	18.54	16.01	14.15	13.62	13.57	13.41
大荔	25.07	21.33	19.12	16.65	15.07	14.63	14.24	14.18
宝鸡	25.26	21.31	18.25	15.22	14.08	13.34	13.27	13.19
杨陵	25.93	20.48	17.52	14.68	13.14	12.55	12.36	12.28
咸阳	26.01	20.67	18.24	15.31	13.56	13.08	12.95	12.88
渭南	25.36	21.28	19.32	16.88	15.21	14.66	14.48	14.32
潼关	24.94	21.68	20.06	17.82	16.45	15.83	15.75	15.57

3 含水量与基质吸力的相关关系

研究表明^[2]:土的基质吸力由两部分组成,即毛管作用引起的吸力和土壤颗粒表面吸着作用引起的吸力。因之,随土壤含水量的变化,基质吸力发生变化,基质吸力的两个组成部分在总基质吸力中所占的比例也在发生变化。土壤含水量与基质吸力的关系曲线实质上是反映这两种作用的共同效应。为了在土壤含水量与基质吸力的关系曲线上反映出基质吸力两个组成部分的变化,本文拟合土壤含水量与基质吸力之间相关关系的数学模式为:

$$w = as^{-b} + cs^{-d} \quad (3)$$

式中: w ——土壤含水量(%); s ——基质吸力(10^5Pa); a, b, c, d ——随取土点而变化的统计参数。

根据基质吸力的量测结果,用 SYSTAT 统计绘图软件包拟合数学模式(3)中的参数 $a, b, c,$

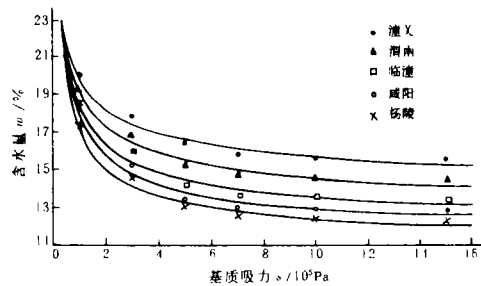


图 1 $w = as^{-b} + cs^{-d}$ 模式拟合曲线

d , 各土样的拟合参数及拟合相关系数 R 见表 2, 几个典型取土点土样的 $w \sim s$ 拟合曲线与实测点的关系如图 1。

表 2 $w = as^{-b} + cs^{-d}$ 数学模式的拟合参数

取土点	a	b	c	d	R
千阳	13.627	0.016	4.384	0.718	0.994
彬县	11.614	0.044	6.171	0.638	0.993
铜川	11.701	0.047	6.612	0.608	0.989
白水	13.875	0.025	4.604	0.565	0.992
合阳	11.869	0.049	6.021	0.539	0.991
岐山	11.843	0.047	6.672	0.495	0.993
淳化	12.908	0.039	5.415	0.546	0.994
临潼	12.885	0.025	5.468	0.586	0.994
大荔	13.924	0.035	5.067	0.518	0.996
宝鸡	12.852	0.035	5.324	0.579	0.997
杨陵	12.271	0.034	5.114	0.673	0.997
咸阳	12.520	0.028	8.389	0.628	0.995
渭南	14.103	0.033	4.998	0.534	0.991
潼关	15.226	0.029	4.611	0.483	0.992

图 2 所示为咸阳、合阳两取土点土样的毛管力与吸着力吸持的含水量随基质吸力的变化过程。从图 2 可以直观地看出: 在高吸力下, 毛管水含量很小, 土壤含水量以吸着水为主, 而且吸着含水量随基质吸力的变化而变化的幅度很小; 在低吸力情况下, 毛管水含量在土壤总含水量中所占的比例随基质吸力的减小而急剧增大, 吸着含水量随基质吸力的减小也在增大, 但增量很小。这与毛管作用和吸着作用的持水机理是一致的。

4 小 结

(1) 陕西关中地区非饱和黄土 (Q_3) 基质吸力

大小取决于土壤含水量, 即含水量越高, 基质吸力越小, 含水量与基质吸力间存在对应关系。

(2) 数学模式 $w = as^{-b} + cs^{-d}$ 定量地描述了吸着作用和毛细作用吸持的含水量随基质吸力的变化过程。该数学模式能很好地拟合陕西关中地区非饱和黄土 (Q_3) 在 $0.1 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{Pa}$ 范围内含水量与基质吸力间的关系。

参 考 文 献

- 1 雷志栋等. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- 2 黄文熙. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- 3 李靖等. 非饱和黄土中的负孔隙压力与其物理性质指标间的关系. 中国土木工程学会第 6 届学术会议论文集, 1991.
- 4 王力. 陕西关中地区马兰黄土基质吸力分布的空间变异性. 西北农业大学硕士论文, 1994.

从表 2 可以看出, 该数学模式拟合的相关系数都在 0.9 以上, F 检验表明拟合极显著。从图 1 的拟合曲线与实测点的关系中也可看出, 该数学模式的拟合程度很高。由此可以认为, 该数学模式能较好地体现非饱和黄土 (Q_3) 在较大的基质吸力变化范围内 ($0.1 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{Pa}$) 含水量与基质吸力的关系。数学模式 $w = as^{-b} + cs^{-d}$ 可以反映出土壤水由毛管力与吸着力分别吸持的含水量。其中 as^{-b} 部分反映了吸着作用吸持的含水量随基质吸力的变化过程, 关系式可写为:

$$w_1 = as^{-b} \quad (4)$$

cs^{-d} 部分反映了毛管作用吸持的含水量随基质吸力的变化情况, 关系式写为:

$$w_2 = cs^{-d} \quad (5)$$

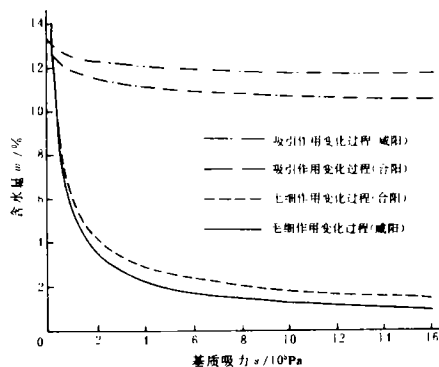


图 2 吸着作用、毛细作用变化过程